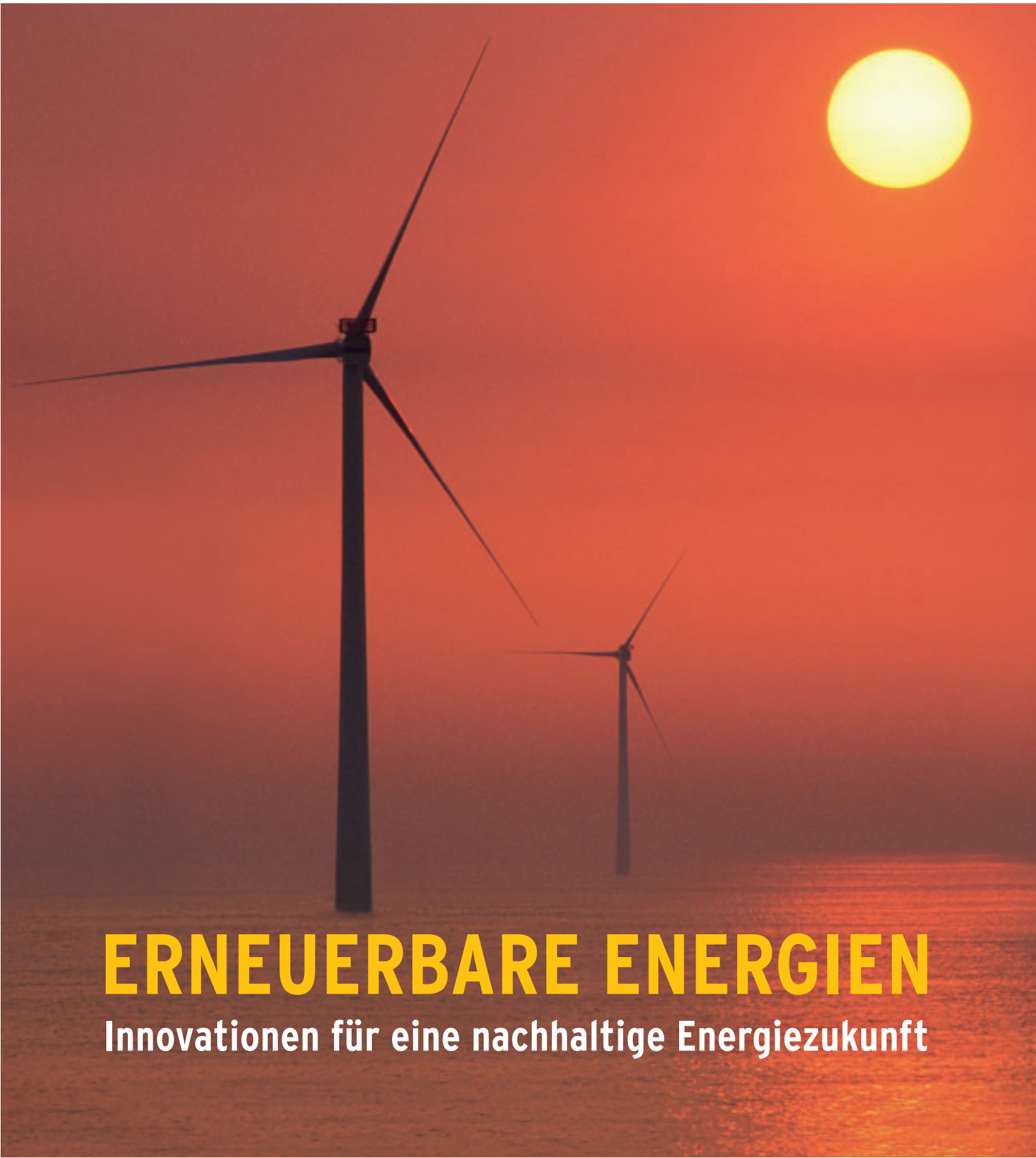
Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit



ERNEUERBARE ENERGIEN

Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft

IMPRESSUM

Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Referat Öffentlichkeitsarbeit • 11055 Berlin
E-Mail: service@bmu.bund.de • Internet: www.bmu.de

Redaktion: Dr. Wolfhart Dürrschmidt, Elke Hammer
BMU, Referat KI III 1 "Allgemeine und grundsätzliche Angelegenheiten der erneuerbaren Energien"

Fachliche Bearbeitung: Dr. Martin Pehnt (IFEU/Koordination) mit
Philipp Otter, Regine Vogt, Guido Reinhardt (IFEU)
Dr. Wolfram Krewitt, Michael Nast, Dr. Joachim Nitsch, Dr. Franz Trieb (DLR)

Gestaltung: BLOCK DESIGN Kommunikation & Werbung
Druck: Silber Druck

Abbildungen: S. 1 (Titel) und S. 3 P. Langrock/Zenit, S. 6 Solar Millenium AG, S. 48 Paul Langrock/Zenit,
S. 52 Mark Edwards/Still Pictures, S. 53 Evonik Power Saar GmbH, S. 54 MVV Energie AG, S. 56 (1) Picture-Alliance,
S. 56 (2) Martin Pehnt, S. 57 Agentur für Erneuerbare Energien, S. 59 Bernd Müller/BMU, S. 60 (1) Haase,
S. 60 (2) MVV Energie (Mannheim), S. 61 Stadtwerke Neckarsulm, S. 62 Daimler AG, S. 63 Norsk Hydro Electrolyseurs,
S. 64 MTU Friedrichshafen, S. 65 (1) RegModHarz-Konsortium, (2, 3) Vestas, S. 66 (1, 2) P. Langrock/Zenit,
S. 67 Enercon, S. 68 (1) Bundesverband Windenergie, S. 68 (2) Stiftung Offshore-Windenergie/DOTI,
S. 69 picture-alliance, S. 70 (1) Paul Langrock/Zenit, (2) Thomas Kläber + BLOCK DESIGN,
S. 71 (1, 2) Bundesverband Windenergie, S. 72 Paul Langrock/Zenit, S. 74 (1) picture-alliance, (2) Werner Otto,
S. 74 (3) picture-alliance, S. 75 Rainer Weisflog, S. 76 blickwinkel/McPhoto, S. 77 DUH, S. 78 (1) Paul Langrock/Zenit,
S. 78 (2) ISFH, (3) FH München, S. 80 (1) ALIMDI.NET/Günter Fischer, (2) www.brinkhoff-fotos.de,
S. 81 (1) Rainer Weisflog, (2) Paul Langrock/Zenit, S. 82 Jochen Zick/Keystone, S. 83 (1) DLR, (2) Stadtwerke Jülich,
S. 83 (3) DLR, S. 84 (1) Solarmundo, (2) DLR/www.markus-steur.de, S. 85 (1) DLR, (2) Hans Blossey/Das Fotoarchiv,
S. 86 (1, 2) DLR, S. 88 Gollmer/Solar Millenium AG, S. 89 (1) Michael Nast/DLR, (2) ExpoStadt, (3) Paul Langrock/Zenit,
S. 90 Jörg Boethling/agenda, S. 91 Michael Nast/DLR, S. 92 (1, 2) Rainer Weisflog, S. 94 Stadtwerke Crailsheim,
S. 95 ExpoStadt, S. 97 Leon Schmidt (TU Darmstadt), S. 98 (1) C.A.R.M.E.N., (2) Haase, (3) Rainer Weisflog,
S. 100 (1) Schapowalow/Weisser, (2) argum/Falk Heller, S. 101 (1) blickwinkel/McPhoto, (2) www.BilderBox.com,
S. 103 und 104 Rainer Weisflog, S. 107 (1) Nordzucker, S. 107 (2) Iogen, (3) Jochen Zick/Keystone,
S. 108 emo-pictures, S. 109 (1) Wolfgang Steche/VISUM, S. 109 (2) Jochen Zick/Keystone, S. 111 Choren Industries,
S. 112 picture-alliance, S. 113 Rainer Weisflog, S. 115 ALIMDI.NET/Konrad Wothe, S. 117 (1) Hans-Günter Wessely/photoplexus,
S. 117 (2) picture-alliance, (3) Bestec GmbH, S. 119 Bestec GmbH, S. 120 (1) Pfalzwerke AG, (2) Bestec GmbH,
S. 124 picture-alliance, S. 125 (1) Universität Stuttgart, (2) ISET, S. 125 (3) Voith AG, S. 126 bis 129 ISET

Stand: Juni 2009
7. akt. Auflage: 20.000 Exemplare

Einleitung

Seit zehn Jahren gibt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit diese Publikation zu erneuerbaren Energien heraus – in immer wieder aktualisierter Fassung. In dieser Zeit haben die Technologien, die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, die Förderinstrumente, aber auch das Wissen um die ökologischen Aspekte unserer Energieversorgung immense Fortschritte gemacht. Wir haben gelernt: Eine beherzte Energiepolitik, die auf erneuerbare Energien und Energieeffizienz setzt, ist die beste Versicherung gegen begrenzte Ressourcen, Klimabedrohungen und Lücken in der Versorgung angesichts eines weltweit wachsenden Energiebedarfs. Nur diejenigen Volkswirtschaften, die es verstehen, intelligent mit Energie umzugehen, werden in der globalen Wirtschaft mittel- und langfristig eine führende Rolle einnehmen können.

Es ist in Deutschland gelungen, im Laufe von nunmehr 20 Jahren ein umfangreiches Maßnahmenpaket zu schnüren, das in allen Bereichen der Gesellschaft wirksam wird. Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) haben wir einen wichtigen Meilenstein erreicht. Denn dieses Gesetz hat nicht nur die rasante Entwicklung erneuerbarer Energieträger im Bereich der Stromerzeugung beschleunigt, sondern auch einen stabilen Entwicklungsrahmen für eine gesunde, innovationsstarke Branche geschaffen. Dieser Erfolgskurs soll fortgesetzt werden. Das im Paragraf 1 gesetzlich verankerte Ziel ist ambitioniert: Mindestens 30 Prozent unserer Stromerzeugung sollen erneuerbare Energieträger im Jahr 2020 beisteuern – im Jahr 2008 waren es rund 15 Prozent. Nach dem Jahr 2020 soll ihr Anteil kontinuierlich weiter steigen; dies entspricht im Jahr 2030 bereits rund 50 Prozent.

Auch in den anderen Sektoren sind wir seit der letzten Auflage dieser Publikation im Jahr 2006 ein großes Stück vorangekommen. Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) und das aufgestockte Marktanreizprogramm sind der Ausgangspunkt für eine Verdopplung der Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energien bis 2020. Im Bereich der Biokraftstoffe konnten wesentliche Impulse für eine nachhaltige Nutzung von biogenen Rohstoffen in die europäische Diskussion eingebracht werden.

Das Adersystem eines erneuerbaren Energien-Systems ist die Energie-Infrastruktur – ihr zukunftsgerichteter Ausbau liegt uns daher besonders am Herzen. Der Rechtsrahmen zur Biogaseinspeisung, das Energieleitungsausbaugesetz, aber auch die staatliche Förderung von Wärmenetzen sind Bestandteile einer Infrastrukturpolitik, die auf hohe Anteile erneuerbarer Energien setzt. Unser Blick ist dabei auf die langfristige Entwicklung des Energiesystems gerichtet. Schon heute beweisen einzelne Kommunen und Unternehmen, dass eine Versorgung überwiegend oder ausschließlich auf Basis erneuerbarer Energien auch in der Praxis funktioniert.

Die Vielfältigkeit der Weiterentwicklungen ist ein Zeichen für die Kreativität und Dynamik, die im Bereich der erneuerbaren Energien steckt. Eine aktuelle Wissensbasis ist Voraussetzung für die weitere Entwicklung. Die hier vorliegende Publikation, vollständig aktualisiert und umfangreich ergänzt, bietet daher allen Bürgerinnen und Bürgern einen Überblick, die sich für den aktuellen Stand der Technik, die Potenziale, Entwicklungsperspektiven und Einsatzmöglichkeiten erneuerbarer Energien interessieren. Neben der deutschen erscheint auch eine englische Fassung dieser stark nachgefragten Veröffentlichung.

INHALTSVERZEICHNIS

Erneuerbare Energien: Garanten einer zukunftsfähigen Energieversorgung 6
Die “Nachhaltigkeit” unserer Energieversorgung 8
Fossile Energien – der Motor der heutigen Weltwirtschaft 9
Das Klima gerät aus dem Gleichgewicht 13
Atomenergie – Risiken größer als der Nutzen 15
Energieverschwender und Energiehabenichtse – ein brisanter Zustand 15
Wege zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft 16
Innovationsmotor erneuerbare Energien 17

Die ökologische Qualität der erneuerbaren Energien 20
Klima- und Ressourcenverträglichkeit erneuerbarer Energien 20
CO_2-Vermeidungskosten 22
Andere Umweltwirkungen der erneuerbaren Energien 24
Erneuerbare Energien und Naturschutz 25

Stand und Perspektiven erneuerbarer Energien 29
Heutige Energienutzung in Deutschland 29
Erneuerbare Energien als Wirtschaftsfaktor 30
Die Förderung der erneuerbaren Energien 31
Innovationsstrategie für erneuerbare Energien 35
Potenziale erneuerbarer Energien 35
Die längerfristige Perspektive 42
Erneuerbare Energien in der Europäischen Union 46
Erneuerbare Energien global 47
“Nord” und “Süd” – Nutznießer einer gemeinsamen Energiestrategie 49
Die Bedeutung der Entwicklungsländer 50

Neue Versorgungsstrukturen 53
Systemintegration erneuerbarer Energien 53
Dezentrales Energiemanagement 56
Stromnetze der Zukunft 58
Kraft-Wärme-Kopplung: – erneuerbare Energien effizient genutzt 58
Eintrittskarte in den Wärmemarkt: Nahwärme 60
Erneuerbare Energien im Elektro-Auto 61
Ein Blick in die Zukunft: die Wasserstoffversorgung 62

Windenergie – stark im Aufwind 65
Technik der Windenergienutzung 66
Vor der Küste neue Potenziale erschließen 68
Die Kosten sind kontinuierlich gesunken 70
Natur- und Umweltschutz 70
Windenergie in Deutschland 72

Wasserkraft – bewährt und aktuell 74
Turbinen 75
Kraftwerke 75
Potenziale und Kosten 76
Ökologisch verträglicher Ausbau und Modernisierung 77

Photovoltaik – Sonnenstrom überall 78
Von Milliwatt bis Megawatt: Ein dynamischer Markt 78
Neue Technologien für die Zukunft 79
Anwendungen 81
Ökologisch zahlt es sich aus 82

Solarthermische Kraftwerke – Saubere Energie aus dem Sonnengürtel der Erde 83
Parabolrinnenkraftwerke 84
Fresnel-Kraftwerke 85
Solarturmkraftwerke 85
Paraboloid-/Dish-Anlagen 86
Aufwindkraftwerke 86
Speichertechnologien 87
Solare Kraft-Wärme-Kopplung 87
Kosten solarthermischer Kraftwerke 88
Markteinführung solarthermischer Kraftwerke 88

Sonnenkollektoren und passive Solarnutzung – die Sonne ins Haus geholt 89
Technische Trends 92
Kosten 93
Marktentwicklung 93
Kühlen mit Wärme aus Sonnenkollektoren 93
Perspektiven 94
Passive Solarnutzung – die Architektur macht's möglich 95
Mehrkosten des Wärmeschutzes 97

Biomasse als Brennstoff – der Dauerbrenner für Wärme und Strom 98
Die älteste Nutzungsart: Feuerungen 99
Strom aus Biomasse 100
Biogas – Bakterien am Werk 101
Kosten 103
Potenziale 104
Heutige Nutzung 105
Umweltnutzen biogener Brennstoffe 105

Biokraftstoffe – Mobilität aus Pflanzen und Abfällen 107
Eine Fülle an Möglichkeiten 108
Rohstoff Raps 109
Ölpalmen, Soja und Jatropha 109
Umweltfreundlich am Steuer – mit Bioalkohol im Tank 111
Biokraftstoffe der zweiten Generation 111
Ökobilanz von Biokraftstoffen 112
Biokraftstoffe – nachhaltig genutzt 113
Ein Blick in die Zukunft der Biokraftstoffe 115

Geothermie und Wärmepumpe – Energie aus dem Erdinneren und aus der Umwelt 117
Hot-Dry-Rock-Verfahren 118
Hydrothermale Systeme mit hohem Temperaturangebot 119
Hydrothermale Systeme mit niedrigem Temperaturangebot 120
Tiefe Erdwärmesonden 121
Umweltfolgen der tiefen Geothermie 121
Die Wärmepumpe 121
Kosten und Potenziale der Wärmepumpe 123
Ökobilanz der Wärmepumpe 123
Geothermie-Forschung erforderlich 124

Strom aus dem Meer 125
Wellen 125
Strömung 127
Tidehub 128
Thermische Nutzung 128
Osmose 129
Stand und Potenziale 129

Erneuerbare Energien und darüber hinaus: Was jeder Einzelne zum Klimaschutz beitragen kann 130
Glossar 133

ERNEUERBARE ENERGIEN: GARANTEN EINER ZUKUNFTSFÄHIGEN ENERGIEVERSORGUNG

Binnen zwei Jahrzehnten haben sich die erneuerbaren Energien von einer “alternativen Energiequelle” für wenige Wissenschaftler, Politiker und Pioniere zu einem der wichtigsten wirtschaftlichen Trends des angehenden 21. Jahrhunderts entwickelt. Aus den sprichwörtlichen Garagen- und Hinterhoffirmen in Nord- und Süddeutschland wurden Unternehmen, die sich auf der ganzen Welt engagieren, Milliarden Euro umsetzen und allein in Deutschland mehr als eine viertel Million Menschen beschäftigen. Die Windkraftbranche schafft besonders an den deutschen Küsten neue Jobs – gerade da, von wo man lange Zeit überwiegend trübe Nachrichten aus der Werftbranche vernommen hat. Und die Solarbranche hat sich ihre Heimat in Ostdeutschland gesucht und dort viele ehemalige Mitarbeiter der chemischen Industrie aufgenommen. Windkraft, Biomasse, Solarindustrie und viele weitere Firmen im Umfeld erneuerbarer Energien schaffen heute hochqualifizierte Jobs in einer zukunftssicheren, boomenden Branche und kennen keine Abwanderung von Unternehmen nach Asien oder Osteuropa. Im Gegenteil: Investoren aus Asien, arabischen Ländern und den USA errichten ihre “Öko-Energie-” Fabriken wieder in Deutschland. Und die erneuerbaren Energien schicken sich an, der Autoindustrie als Aushängeschild des “Made in Germany” weltweit den Rang streitig zu machen.

Erneuerbare Energien entnehmen nur geringe Teile der natürlichen Energieströme der Ökosphäre. Zur Regenerierung steht die unerschöpfliche Kraft der Sonne bereit – dieser gigantische Fusionsreaktor, der seit Jahrmilliarden die Erde mit Energie versorgt. Alles Leben auf der Erde bezieht seine Energie aus der Kraft der Sonne. Pflanzen wachsen mit Hilfe von Sonnenstrahlung und bauen Biomasse auf. Die Sonne treibt auch das Wetter an, sorgt für Wind und Niederschläge und schafft so die Voraussetzung für Wind- und Wasserkraft.

Sonnenkollektoren, solarthermische Kraftwerke und Solarzellen nutzen die Sonnenstrahlung direkt ohne den Umweg über ein anderes Medium. Schließlich kann man auch die Erdwärme anzapfen, eine Energie, die aus der Wärme des radioaktiven Zerfalls im Erdinneren und der noch von der Erdentstehung verbliebenen Bewegungsenergie stammt, und die Schwerkraft, die für die Gezeiten verantwortlich ist.

Windkraft, Solarenergie, kleine Wasserkraftwerke und die Energie aus Biomasse und Erdwärme haben vor nicht so langer Zeit lediglich einen homöopathischen Anteil an der deutschen Energieversorgung gehabt. Heute tragen sie besonders in der Stromversorgung einen wesentlichen Teil dazu bei, dass sich in Deutsch-

land die Waschmaschinen drehen, das Licht angeht und in den Betrieben die Maschinen laufen. Diese erstaunliche Entwicklung ist das Ergebnis einer Melange aus Ingenieurgeist, Umweltbewusstsein und konsequenter Politik. Deutschland hat seit den 1990er Jahren mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und seinen Vorläufer-Regelungen denjenigen Technikern und Kaufleuten ein Experimentierfeld eröffnet, die getrieben durch ein erwachendes Klimabewusstsein und ihrer Ablehnung der Atomenergie eine neue, nachhaltige Energieversorgung entwickeln wollten.

Auch in Meinungsumfragen gibt seitdem eine konstant hohe Mehrheit der Bürger an, dass sie für die Förderung und den Ausbau der Erneuerbaren sind. Und dennoch konnte kaum jemand ahnen, wie schnell die Ideen der Visionäre einmal real werden sollten. Alle Prognosen zum Ausbau der erneuerbaren Energien haben Wind- und Solarkraft immer wieder übertroffen. Heute investieren auch die Großkonzerne in Branchen, denen sie lange skeptisch gegenüber standen.

Dabei ist die Erneuerbare-Energie-Branche mehr als nur irgendein neuer technischer Trend, mit dem sich Geld verdienen lässt. Diese Technologien sind das bisher erfolgreichste Mittel im Kampf gegen den Klimawandel, weil sie Energie bereit stellen, ohne das Klimagas Kohlendioxid auszustoßen. Sie eröffnen Industriestaaten wie Entwicklungsländern gleichermaßen die Möglichkeit, die benötigte Energie im eigenen Land zu erzeugen und so wertvolle Devisen in die eigene Entwicklung zu investieren. Und zwar dauerhaft. Damit verringern sie die Abhängigkeit von den immer knapper werdenden fossilen Rohstoffen, besonders von Öl und Gas. Und entschärfen die Krisen und Kriege rund um die Regionen, in denen sich heute die größten Vorkommen finden.
Das "Aber" lautet: Erneuerbare Energien sind in einer betriebswirtschaftlichen Betrachtung häufig noch teurer als Strom und Wärme aus fossilen und nuklearen Rohstoffen (aus einer volkswirtschaftlichen Perspektive sind sie allerdings bereits heute günstiger). Und so bedeutend die Erneuerbare-Energie-Branche auch ist, steckt sie doch noch in den Anfängen und braucht die helfende Hand der Regierung, wenn sie sich in einem Staat behaupten soll. Doch die Entwicklung der umweltfreundlichen Technologien geht so rasant vorwärts, dass man heute sagen kann: In wenigen Jahren werden Wärme und Strom aus erneuerbaren Energien ihre Startphase überwunden haben und auch beim Marktpreis die herkömmlichen Energieträger hinter sich lassen. Und vielleicht geht es wieder mal schneller, als viele Experten heute erwarten.

→ Erneuerbare Energiequellen

Primärenergiequelle	Erscheinungsform	Natürliche Energieumwandlung	Technische Energieumwandlung	Sekundärenergie
SONNE	Biomasse	Biomasse-Produktion	Heizkraftwerk / Konversionsanlage	Wärme, Strom, Brennstoff
	Wasserkraft	Verdunstung, Niederschlag, Schmelzen	Wasserkraftwerk	Strom
	Windkraft	Atmosphärenbewegung	Windenergieanlage	Strom
		Wellenbewegung	Wellenkraftwerk	Strom
	Solarstrahlung	Meeresströmung	Meeresströmungskraftwerk	Strom
		Erwärmung der Erdoberfläche und Atmosphäre	Wärmepumpen	Wärme
			Meereswärmekraftwerk	Strom
		Solarstrahlung	Photolyse	Brennstoff
			Solarzelle, Photovoltaik-Kraftwerk	Strom
			Kollektor, solarthermisches Kraftwerk	Wärme, Strom
MOND	Gravitation	Gezeiten	Gezeitenkraftwerk	Strom
ERDE	Isotopenzerfall und Restwärme aus Erdentstehung	Geothermik	Heizwerk, Heizkraftwerk	Wärme, Strom

Erneuerbare Energien beziehen ihre Kraft vor allem aus der Sonnenstrahlung, aber auch aus dem Isotopenzerfall und der Restwärme der Erdentstehung im Erdinneren sowie der Gravitationskraft zwischen Erde und Mond.

Eine Energienutzung ist nachhaltig, wenn sie eine ausreichende und dauerhafte Verfügbarkeit von geeigneten Energieressourcen sicherstellt und zugleich die negativen Auswirkungen von Energiebereitstellung, -transport und -nutzung begrenzt.

Die Nachhaltigkeit unserer Energieversorgung

Der Begriff "nachhaltige Entwicklung" prägt seit etwa zwei Jahrzehnten die Diskussionen, wenn es um einen schonenden Umgang mit unserer natürlichen Umwelt, um eine gerechtere Verteilung des Wohlstands in der Welt und um eine humane Gestaltung der Lebensgrundlagen für alle Menschen geht. Nachhaltigkeit umfasst somit sowohl ökologische als auch ökonomische und soziale Aspekte, die stets gemeinsam und in ihrer Wechselwirkung betrachtet werden müssen. Eine umfassende Definition von Nachhaltigkeit wurde erstmals von der Brundtland-Kommission erarbeitet und von der Rio-Konferenz 1992 aufgegriffen:

"Nachhaltige Entwicklung befriedigt die Bedürfnisse der heutigen Generationen, ohne die Fähigkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihre eigenen Lebensstile zu wählen."

Für diese nachhaltige Entwicklung spielt Energie eine zentrale Rolle. Die Art ihrer Verfügbarkeit wirkt sich praktisch in allen Bereichen sozialen, ökonomischen und politischen Handelns aus; der Zustand von Umwelt und Klima wird durch sie beeinflusst, vielfach entscheidet sie über ein friedliches oder konfliktbelastetes Zusammenleben von Völkern. Einer Interpretation des Umweltministeriums zufolge ist *"die Energienutzung nur nachhaltig, wenn sie eine ausreichende und dauerhafte Verfügbarkeit von geeigneten Energieressourcen sicherstellt und zugleich die negativen Auswirkungen von Energiebereitstellung, -transport und -nutzung begrenzt."*
Daraus lassen sich konkrete Leitlinien definieren, die als Orientierung für die im Energiesektor handelnden Akteure und für die Entwicklung energiepolitischer Handlungsstrategien dienen können (siehe Kasten).

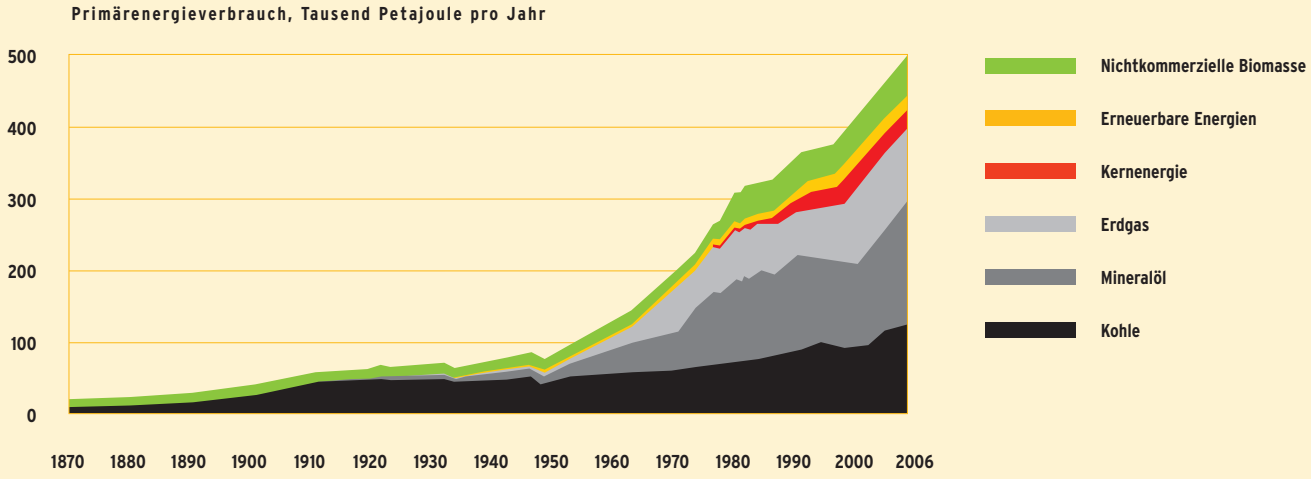
Leitlinien für eine weltweit nachhaltige Energieversorgung

Quelle: In Anlehnung an HGF 2001

- **1. Zugang und Verteilungsgerechtigkeit für alle:**
  Alle Menschen sollen vergleichbare Chancen beim Zugang zu Energieressourcen und zu Energiedienstleistungen haben.
- **2. Ressourcenschonung:**
  Wir dürfen die heutigen Energiequellen nicht zu Lasten kommender Generationen ausbeuten.
- **3. Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit:**
  Die Anpassungs- und Regenerationsfähigkeit der Umwelt darf nicht durch energiebedingte Emissionen und Abfälle überfordert werden.
- **4. Soziale Verträglichkeit:**
  Bei der Gestaltung von Energieversorgungssystemen sollen alle Betroffenen teilhaben.
- **5. Risikoarmut und Fehlertoleranz:**
  Die Risiken der Energiebereitstellung und -nutzung müssen gering gehalten werden.
- **6. Umfassende Wirtschaftlichkeit:**
  Energie soll für den Einzelnen und gesamtwirtschaftlich bezahlbar bleiben.
- **7. Bedarfsgerechte Nutzungsmöglichkeit und dauerhafte Versorgungssicherheit:**
  Die Energieversorgung soll auf so vielen verschiedenen Säulen beruhen, dass sie flexibel auf die Bedürfnisse der Gesellschaft zugeschnitten ist und auf mögliche Krisen reagieren kann.
- **8. Internationale Kooperation:**
  Die Energieversorgung soll sich so entwickeln, dass Ressourcenkonflikte mit anderen Staaten gelöst werden und eine friedliche Kooperation durch gemeinsame Nutzung der jeweiligen Fähigkeiten und Potenziale gefördert wird.

→ Entwicklung des Primärenergieverbrauchs

Quellen: IEA Statistiken u.a.



Entwicklung des weltweiten Primärenergieverbrauchs zwischen 1870 und 2006 sowie seiner Deckung nach Energiequellen einschließlich der nichtkommerziellen Nutzung von Biomasse (Brennholz)

Diese Leitlinien sind als Mindestanforderungen einer nachhaltigen Entwicklung zu verstehen. Andere für die weitere Entwicklung von Gesellschaften und Staaten wesentliche Aktivitäten, wie die Vermehrung von Wohlstand oder von Freizügigkeit, sollten sich deshalb nur in einem Maß entfalten, das die Mindestanforderungen der Nachhaltigkeit nicht gefährdet.

Misst man nämlich die heutige Energieversorgung an den Mindestanforderungen einer nachhaltigen Entwicklung, so lassen sich wesentliche Defizite erkennen:

- der übermäßige Verbrauch begrenzter Ressourcen
- die sich abzeichnende globale Klimaveränderung
- das extrem starke Gefälle des Energieverbrauchs zwischen Industrie- und Entwicklungsländern
- die Risiken der Atomenergienutzung

In nur wenigen hundert Jahren verbraucht die Menschheit in Jahrmillionen entstandene, wertvolle Rohstoffe und belastet zudem mit ihren Rückständen die Umwelt.

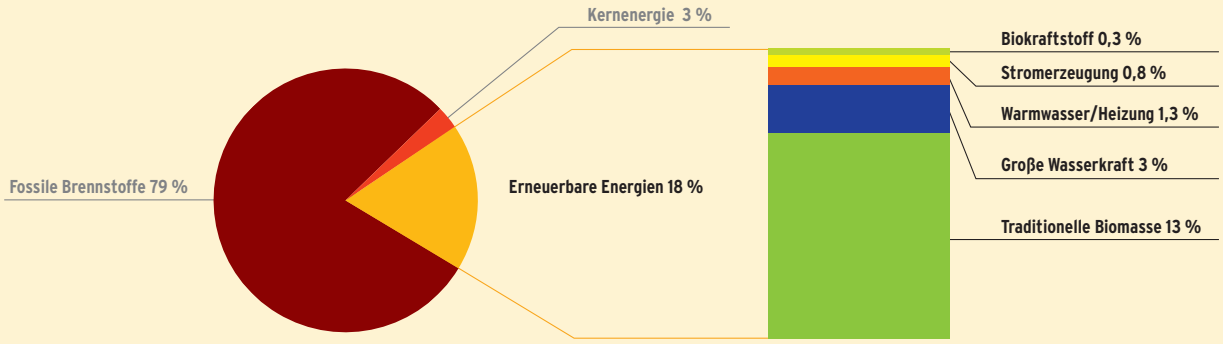
Fossile Energien – der Motor der heutigen Weltwirtschaft

Seit Beginn der Industrialisierung wächst der globale Energieverbrauch deutlich rascher als die Anzahl der Menschen. Während die Weltbevölkerung seit 1870 bis heute um das Vierfache auf 6,7 Milliarden Menschen stieg (2008), wuchs der weltweite Energieverbrauch und damit der Verbrauch fossiler Ressourcen an Kohle, Mineralöl und Erdgas um das Sechzigfache auf rund 490.000 Petajoule (PJ) im Jahr 2006. Ein Mensch verbraucht heute im Durchschnitt 16mal mehr Energie als vor 130 Jahren (Grafik “Entwicklung des Primärenergieverbrauchs”), die Bürger der Industriestaaten noch wesentlich mehr. Historische Einschnitte, wie die beiden Weltkriege, die Ölpreiskrisen oder der gravierende Rückgang der Industrieproduktion in den Staaten der früheren Sowjetunion haben diesen Wachstumstrend nur kurz unterbrochen. Bezogen auf den globalen Endenergieverbrauch stellen erneuerbare Energien mittlerweile 18 % (2006) bereit, davon 13 % in Form des traditionellen Einsatzes von Biomasse als Brennholznutzung in zahlreichen wenig entwickelten Ländern. Die übrigen erneuerbaren Energien, allen voran die Wasserkraft, haben zusammen einen Anteil von rund 5 %. Das ist mehr als Atomenergie, die nur 3 % des Endenergiebedarfs deckt. Aber immer noch basieren fast 80 % der Weltenergieversorgung auf fossilen Energieträgern, bei der kommerziellen Nutzung sogar fast 90 %.

Über Hunderte von Jahrmillionen Jahre Photosynthese waren notwendig, um die energiereichen Kohlenstoffverbindungen aufzubauen, die in Kohle, Öl und Gas stecken. In nur wenigen hundert Jahren wird die Menschheit diese wertvollen Rohstoffe verbrauchen und mit den Rückständen daraus die Umwelt belasten. Sowohl die weltweite als auch die deutsche Energieversorgung stützen sich überwiegend auf die endlichen fossilen Energieträger Kohle, Mineralöl und Erdgas. Es ist klar, dass selbst bei einem sehr raschen Umsteuern in der Energieversorgung fossile Energien noch Jahrzehnte eingesetzt werden. Damit gewinnt die Frage nach den noch verfügbaren Ressourcen und den Reichweiten dieser Energieträger eine zentrale Bedeutung.

→ Anteil erneuerbarer Energien am globalen Endenergiebedarf 2006

Quelle: REN 21, 2008



Der globale Anteil erneuerbarer Energien liegt derzeit bei rund 18 %

Bei den Reserven handelt es sich um jene Energiemengen, die sicher nachgewiesen und mit den heutigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich abbaubar sind; Ressourcen sind dagegen Mengen, die entweder geologisch nachgewiesen, aber derzeit nicht wirtschaftlich förderbar sind, oder Mengen, die nicht nachgewiesen sind, jedoch aus geologischen Gründen in dem betreffenden Gebiet erwartet werden können.

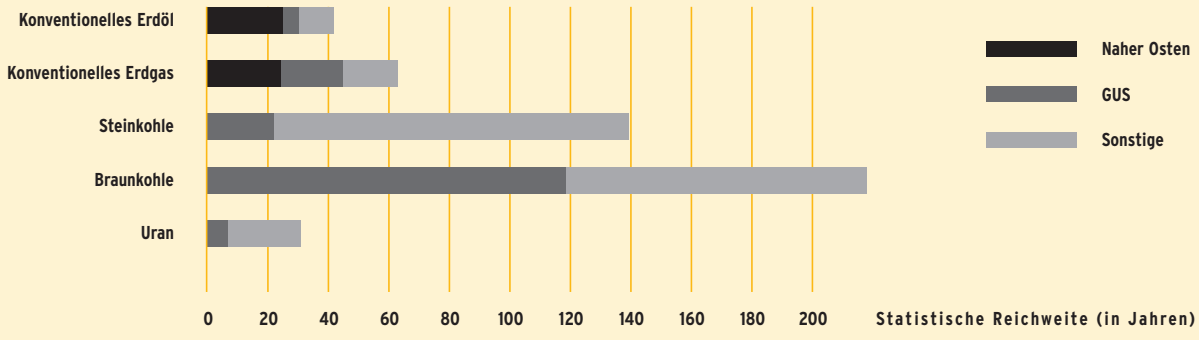
Die noch vorhandenen Reserven an fossilen Energien betragen knapp 38 Millionen Petajoule (Stand 2007), was etwa dem 80fachen des derzeitigen jährlichen Weltenergieverbrauchs entspricht (Grafik "Reichweiten der Energiereserven"), aber lediglich das 2,2-fache der bereits insgesamt verbrauchten Menge an fossilen Energien. Kohle macht gut die Hälfte dieser Reserven aus.

Konventionelles Erdöl mit 18 % der noch vorhandenen Reserven ist im Verhältnis zu anderen fossilen Energieträgern bereits am stärksten ausgebeutet. Vergleicht man dies mit der großen gegenwärtigen Bedeutung des Erdöls mit einem Anteil von 38 % an der globalen Energieversorgung, wird klar, dass hier in absehbarer Zeit auch auf die nicht konventionellen Ölreserven (Schweröl, Ölschiefer, Ölsande) und auf die teureren Ressourcen zurückgegriffen werden muss, wenn die weiterhin steigende Nachfrage auch in Zukunft gedeckt werden soll. Große Ressourcen, also bisher nicht wirtschaftlich erschließbare Vorkommen in Höhe von 255 Millionen Petajoule werden noch bei der Kohle vermutet.

Die sich abzeichnenden Verknappungstendenzen der Reserven von Öl und Erdgas spiegeln sich auch in den "statischen Reichweiten" dieser Energien wider (siehe Grafik "Statische Reichweiten"). Darunter ist die Zeitdauer zu verstehen, in der die Reserven bei ihrem gegenwärtigen Verbrauch vollständig erschöpft sein werden. Konventionelles Erdöl hat mit 42 Jahren die geringste Reichweite, bezieht man unkonventionelles Erdöl mit ein – also Schweröle, Ölsand und Ölschiefer – so liegt dieser Wert bei 58 Jahren. Erdgas reicht bei gleichbleibendem Verbrauch noch etwa 63 Jahre, während uns die Reserven von Kohle deutlich länger zur Verfügung stehen. Uran, eine weitere endliche Energiequelle, reicht bei einer Nutzung in Leichtwasserreakto-

→ Reichweiten der Energiereserven

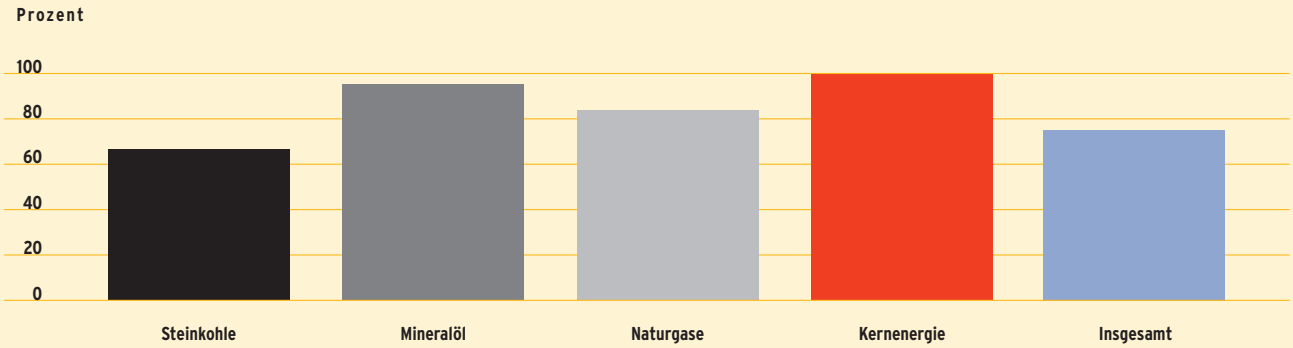
Quelle: BGR 2007



Statische Reichweite weltweiter Energiereserven (bei unverändertem Verbrauchsniveau)

→ Importabhängigkeit Deutschlands

Quelle: BMWi 2007



Anteil importierter Energierohstoffe an der deutschen Energieversorgung 2006

→ Die sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien

Auf der ganzen Welt decken heute fossile Energieträger wie Kohle, Öl und Gas unseren Energiebedarf. Die Globalisierung "macht die Welt kleiner" und verstärkt somit das Konfliktpotenzial auf internationaler Ebene: Die Abhängigkeit der energieverbrauchenden von den energieproduzierenden Staaten steigt ständig. Zentralisierte Versorgungsstrukturen bieten eine Angriffsfläche für terroristische Anschläge. Nebenher schaffen und verstärken die geostrategischen Ressourcen regionale Krisen. Viele unterentwickelte Länder leiden noch heute unter Energiearmut: Der daraus resultierende Mangel an Grundversorgung und die Ungerechtigkeiten in der Versorgung mit Energie schaffen ein großes Konfliktpotenzial auf lokaler und globaler Ebene.

Erneuerbare anstelle fossiler Energieträger lösen eine ökologische Transformation unseres bestehenden Energiesystems aus. Dieser Wandel kann einen wesentlichen friedenspolitischen Beitrag zu einer verstärkten globalen Energiesicherheit leisten und bringt viele Vorteile mit sich:

Eine Versorgung unter Einsatz erneuerbarer Energien bedeutet eine **Senkung der Importabhängigkeit**: In Deutschland liegt der Anteil importierter Energieträger insgesamt bei über siebzig Prozent, wenn man die oft ignorierte Einfuhr von Kernbrennstoffen nicht außer Acht lässt (siehe Grafik "Importabhängigkeit").

Der Ausbau der erneuerbaren Energien kann auch einen Beitrag zu einer verbesserten **inneren Sicherheit** leisten: Die Diskussion um die Sicherheit von Atomkraftwerken gegenüber terroristischen Anschlägen seit dem 11. September 2001 zeigt deutlich die Vorteile einer Abschaffung solcher Risikotechnologien. Setzt man erneuerbare Energien ein, so werden die Energieproduktionsstätten dezentralisiert. Diese Veränderung der Versorgungsstrukturen reduziert die nationale **Verwundbarkeit**.

In engem Zusammenhang hiermit steht auch die **Diversifizierung von Energieträgern** und Produzentenländern beim Einsatz erneuerbarer Energien: Eine breite Palette von Arten der Energiebereitstellung steigert die Versorgungssicherheit. Die EU intensiviert diesen positiven Prozess durch eine Liberalisierung der Energiemärkte.

Zusätzlich kann der vermehrte Einsatz erneuerbarer Energien **neue Entwicklungsmöglichkeiten** schaffen: Durch ihre Dezentralität können die erneuerbaren Energieträger einen Beitrag zu einer gerechteren Verteilung der Wertschöpfung aus der Energiebereitstellung erreichen. Das gilt insbesondere für Länder wie Angola, Kongo-Brazaville oder Äquatorial Guinea, die zu über 80 % vom Ölexport abhängig sind. Die Profite dieses Exportes gehen dabei oft nur an kleine Eliten, die auch die Streitkräfte einsetzen, um ihre Privilegien zu schützen ("Ressourcenfluch"). Außerdem ermöglichen erneuerbare Energien den Zugang zu einer modernen Infrastruktur – Beleuchtung, Kommunikation, medizinische Versorgung – gerade in ländlichen Regionen (siehe S. 51).

Flankierend ist bei der Entwicklung erneuerbarer Energien sicherzustellen, dass negative Folgeschäden vermieden werden, wie etwa bei der Palmölnutzung in Indonesien oder Malaysia durch Konkurrenz des Bioenergiehandels mit dem Recht indigener Völker (siehe Kapitel "Biokraftstoffe").

→ Sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien

Quelle: IFEU nach Wuppertal Institut & Adelphi Consult

Senkung der Importabhängigkeit
Deutschland ist heute schon importabhängig (Kernbrennstoffe 100 %/ Rohöl 97 %/Erdgas 83 %)
Reduzierung der Verwundbarkeit
Abschaffung von Risikotechnologien (Atomkraft)
Dezentralisierung der Versorgungsstrukturen (Übertragungsnetze und Erzeugungsstätten)
Reduktion der Folgen des Klimawandels
Senkung des Ausstoßes von Treibhausgasen
Extreme Wetter, ein Rückgang an fruchtbaren Böden und schlechtere Wasserverfügbarkeit verschärfen regionale Ressourcenkonflikte – Entwicklungsländer werden besonders hart getroffen
ERNEUERBARE ENERGIEN UND SICHERHEIT
Schaffung neuer Entwicklungsmöglichkeiten
Energiezugang für ressourcenarme Länder (ländliche Elektrifizierung)
Regional gerechtere Verteilung der Profite aus dem Export von Energieressourcen
Milderung der sozialen und gesundheitlichen Beeinträchtigungen in unterentwickelten Ländern
Diversifizierung von Energieträgern und Produzentenländern
Steigerung der Versorgungssicherheit durch verschiedene Möglichkeiten und Orte der Energieerzeugung
Entschärfung des Konfliktpotenzials zwischen den erdölexportierenden und den erdölimportierenden Ländern

ren und ohne Aufbereitung der Kernbrennstoffe nur etwa 30 Jahre. Zunächst mögen diese Zeiträume wenig besorgniserregend erscheinen. Eine solche Betrachtung lässt aber dreierlei außer Acht:

- **Mit steigenden Preisen und in der Folge wirtschaftlichen Verwerfungen ist schon weit vor dem Versiegen der fossilen Energievorräte zu rechnen**, nämlich ab dem Zeitpunkt, an dem die Förderung die Nachfrage auf Dauer nicht mehr decken kann. Beim Erdöl wird das Maximum der Ölförderung ("Peak oil") bald überschritten sein; der "mid-depletion point", bei dem die Hälfte der Erdölvorräte verbraucht ist, dürfte bei gleichbleibender oder steigender Förderung in den nächsten fünf bis 20 Jahren erreicht sein. Spätestens dann dürften deutliche Preissteigerungen beim Rohöl auftreten. Erdgas allein kann die Deckungslücke nicht übernehmen und die Reserven an unkonventionellem Öl sind allemal teurer und deutlich umwelt- und klimaschädlicher. Wenn die Menschheit dagegen heute beginnt, den Verbrauch endlicher Energieträger zu mindern, so schützen wir uns vor den Gefahren zukünftiger, möglicherweise ähnlich drastischer Preissprünge, wie sie in den siebziger Jahren und Ende 2008 bei Erdöl zu beobachten waren.

- Die Reserven an Erdöl und Erdgas sind zudem sehr **ungleichmäßig über den Globus verteilt**. Über 70 % der Erdölreserven und über 65 % der Erdgasreserven befinden sich innerhalb einer "strategischen Ellipse" von Ländern, die von Saudi-Arabien im Süden über Irak und Iran bis nach Russland reicht. Nimmt man beide Tatsachen zusammen, so wird klar, welche brisante Versorgungssituation in absehbarer Zeit auf den "energiehungrigen Westen" zukommen kann. Der gesicherte Zugang zu preisgünstigen Energieressourcen ist für die Industrieländer schon heute von so großer Bedeutung, dass er zur Entstehung und Vertiefung einer Vielzahl politisch oder sogar **militärisch ausgetragener Konflikte** beiträgt.

- Auch die **intergenerative Gerechtigkeit** (die gerechte Verteilung der Ressourcen zwischen heutigen und zukünftigen Generationen) wird ignoriert. Selbst wenn heutige Generationen zu dem Schluss kommen

sollten, dass trotz der Ausbeutung der Reserven fossiler und nuklearer Energieträger zukünftigen Generationen eine angemessene Handlungsbasis erhalten bleibt, so muss angesichts der langen Entwicklungs- und Einführungszeiträume von neuen Energietechnologien die Mindestforderung lauten: Die Heutigen müssen mit der Einführung neuer Technologien beginnen, die nicht mehr auf den Einsatz fossiler oder nuklearer Brennstoffe angewiesen sind, und die Umstellung des Energiesystems voranbringen. Selbst wenn wir das schaffen, hinterlassen wir den künftigen Generationen den fortschreitenden Klimawandel mit seinen Schäden.

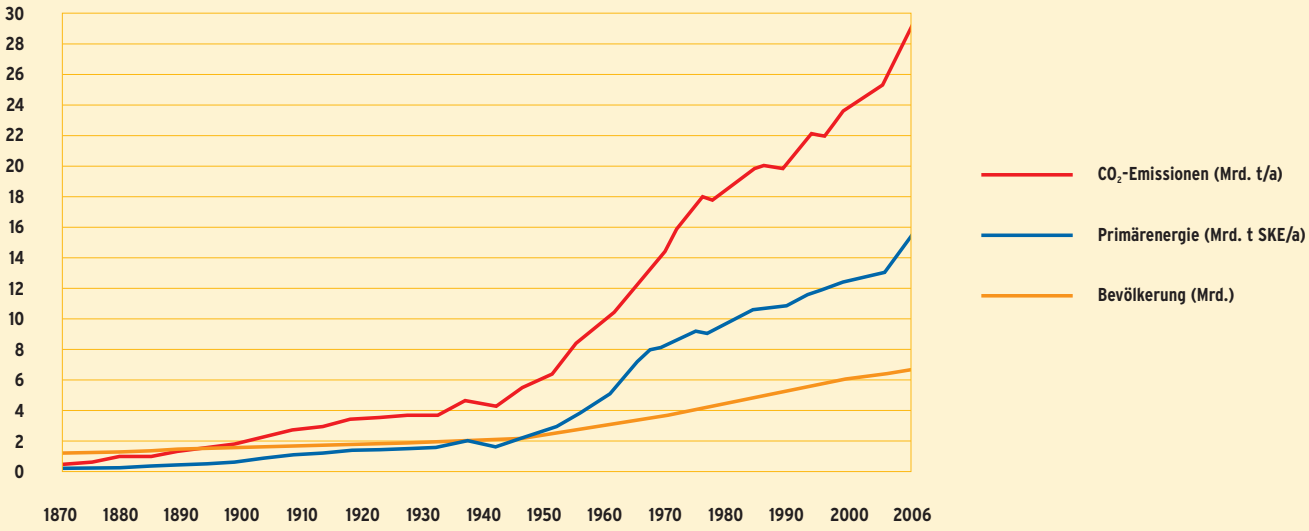
Das Klima gerät aus dem Gleichgewicht

Es ist nicht nur die Erschöpfung der fossilen Ressourcen, die ein Umdenken über den Umgang mit Energie erzwingt. Auch die vielfach erschöpfte Aufnahmefähigkeit unserer Umwelt für die Abfallprodukte der Energienutzung macht ein Umlenken notwendig. Dies gilt insbesondere für jene Abfälle, die in die Atmosphäre entlassen werden. Bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehen Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid und Stickoxide, die zur Bildung des sauren Regens beitragen. Findet die Verbrennung nicht vollständig statt, werden Kohlenmonoxide, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Rußpartikel emittiert; bei festen Brennstoffen können darüber hinaus erhebliche Mengen an Staub auftreten. Diese Emissionen und noch eine Vielzahl anderer schädigen nicht nur die Umwelt, sondern sind für den Menschen auch direkt gesundheitsschädigend. Neben diesen klassischen Luftschadstoffen wird bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern immer auch Kohlendioxid freigesetzt. Dieses Gas ist zwar für Organismen nicht giftig, es verstärkt aber den Treibhauseffekt und führt damit zu einer Erhöhung der globalen Temperaturen. Seit Beginn der Industrialisierung ist die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre um ein Viertel angestiegen und hat eine Erhöhung der mittleren bodennahen Lufttemperatur von 0,6 ± 0,2 °C bewirkt. Werden keine deutlichen Gegenmaßnahmen zur Reduktion dieser und anderer klimarelevanter Emissionen ergriffen, so wird nach Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mit einem weiteren Anstieg der mittleren globalen bodennahen Lufttemperatur zwischen 1,1 °C und 6,4 °C bis zum Jahr 2100 gerechnet, wobei regional die Änderungen durchaus unterschiedlich stark ausfallen können. Neben der Temperaturerhöhung sind in deutlich stärkerem Maße als bisher Änderungen der Niederschlagsverteilung, ein Anstieg extremer Wettersituationen wie Stürme und Starkregen, eine Verschiebung von Klima- und Vegetationszonen und die Verschlechterung der Böden mit fatalen Folgen für die ohnehin angespannte Welternährungssituation zu erwarten. Klimaänderungen haben in der Erdgeschichte häufig stattgefunden; bedrohlich an den heute zu beobachtenden Veränderungen ist, dass die Änderungen mit hoher Geschwindigkeit auftreten und weder den menschlichen Zivilisationen noch der Umwelt einen ausreichenden Zeitraum zur Anpassung lassen (z. B. die Umsiedlung der Menschen aus Küstengebieten wie Ditmarschen in Schleswig-Holstein oder aus Teilen Bangladeschs).

Energiebedingte CO_2-Emissionen tragen global etwa zur Hälfte zum menschlich verursachten Treibhauseffekt

→ Entwicklung der globalen CO_2-Emissionen

Quelle: DLR



Entwicklung der globalen energiebedingten CO_2-Emissionen seit 1870 und ihre Hauptursachen: Bevölkerungszuwachs und Verbrennung von Kohle, Mineralöl und Erdgas (1 Gt SKE [Steinkohleeinheiten] entspricht 29,3 EJ)

Um den globalen Temperaturanstieg zu begrenzen, müssen Industrieländer bis zur Mitte des Jahrhunderts die CO_2-Emission um 80 bis 95 % senken.

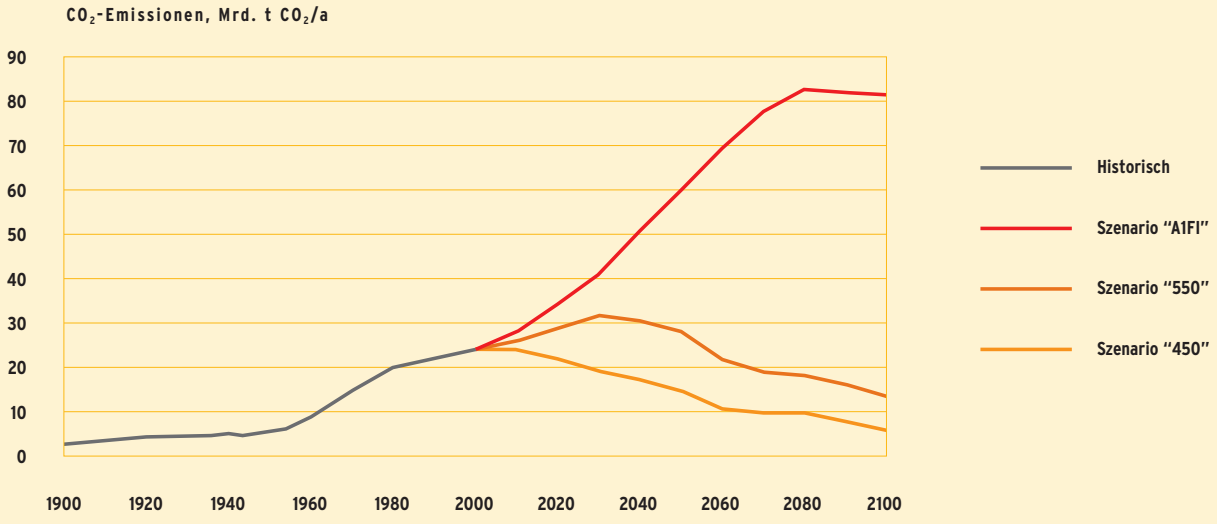
bei. Daher stehen sie im Mittelpunkt der Bemühungen um den Klimaschutz. Der Anstieg dieser energiebedingten globalen Kohlendioxidemissionen im Gefolge des wachsenden Weltenergieverbrauchs, die 2007 rund 30 Milliarden Tonnen CO_2 erreicht haben, hat dazu geführt, dass seit Beginn der Industrialisierung insgesamt zusätzliche 1000 Milliarden Tonnen CO_2 in die Atmosphäre emittiert wurden, davon allein 80 % in den letzten 50 Jahren. Da das Wachstum vornehmlich in den Industrieländern stattfand, sind diese für rund 90 % der bis heute durch den Energieeinsatz entstandenen CO_2-Emissionen verantwortlich. Deutschland hat 2008 839 Millionen Tonnen Kohlendioxid emittiert, das sind rund 3 % der weltweiten Emissionen. Jeder Bewohner Deutschlands ist damit für den Ausstoß von über 10 Tonnen Kohlendioxid pro Jahr verantwortlich. Ein US-Amerikaner bläst pro Jahr 20 Tonnen in die Luft, ein Chinese 4,6 Tonnen und ein Inder eine Tonne. Die große Verantwortung der Industrieländer für den Treibhauseffekt wird hierdurch besonders deutlich. Allerdings steigen gerade in den Schwellenländern Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen rasant.

Die globale Klimaerwärmung infolge der Verbrennung fossiler Energieträger, des Raubbaus an Wäldern und einer industriell betriebenen Landwirtschaft mit ihren Emissionen des klimawirksamen Lachgases wird heute ganz überwiegend als gesichert betrachtet. Um eine Erwärmung von mehr als 2 Grad zu vermeiden, sollte die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre, die derzeit bei 360 tausendstel Prozent (auch "parts per million", ppm) liegt, bis zum Ende dieses Jahrhunderts höchstens auf 450 ppm steigen (Grafik "Szenarien der globalen CO_2-Emissionen"). Will man dies erreichen, so ist eine weltweite Reduktion der energiebedingten CO_2-Emissionen um mehr als die Hälfte bis zum Jahr 2100 unerlässlich. Berücksichtigt man die weiter wachsende Bevölkerung, so darf jeder der dann voraussichtlich zehn Milliarden Erdenbürger durchschnittlich nur noch wenig mehr als eine Tonne CO_2 emittieren – etwa so viel wie ein Inder heute. Daraus abgeleitet ergibt sich für Deutschland das längerfristige Ziel, eine Senkung der nationalen CO_2-Emissionen auf höchstens ein Fünftel der Emissionen des Jahres 1990 zu erreichen.

Im Gegensatz zu den klassischen Luftschadstoffen haben die negativen Wirkungen des Kohlendioxids globalen Charakter, sie machen sich nicht sofort, sondern schleichend und regional sehr unterschiedlich bemerkbar. Eine Verminderung der Emissionen führt nicht direkt zu

→ Szenarien der globalen CO_2-Emissionen

Quelle: IPCC 2002



Szenario:	Historisch	"A1FI"	"550"	"450"
Kumulierte CO_2 (Gt C):	300	2.200	1.000	700
CO_2-Konzentration in 2100 (ppm):	(360)	950	550	450
mittlerer Temperaturanstieg (°C):	0,4 – 0,8	4,5 – 5,0	2,5 – 3,0	1,5 – 2,0

Entwicklung der energiebedingten CO_2-Emissionen in verschiedenen IPCC-Szenarien im Vergleich zum historischen Verlauf und ihre Auswirkungen auf CO_2-Konzentration und Temperatur in der Atmosphäre ("A1FI": Wachstumsszenario mit Deckung durch weitgehend fossile Energien; "450" und "550": jeweilige Mittelwerte von Szenarien, die zu einer stabilen Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre führen)

lokalen Vorteilen für die dortigen Energieverbraucher. Erst wenn weltweit Maßnahmen ergriffen werden, können die CO_2-Emissionen in dem notwendigen Ausmaß reduziert werden. Einzelne Staaten oder Staatengruppen müssen allerdings eine wichtige Vorreiterrolle übernehmen.

Angesichts der weitreichenden Gefahren des Treibhauseffektes ist der Klimaschutz eine ganz zentrale Begründung für eine nachhaltige Energiewirtschaft. Selbstverständlich dürfen bei allen Anstrengungen zum Klimaschutz andere Ziele nicht aus den Augen geraten: Die Sicherung einer ökonomisch und sozial verträglichen Energieversorgung, aber auch weitere umweltrelevante Ziele, wie die weitere Minderung von anderen Schadstoffen; der Stopp der großflächigen Landschaftszerstörung bei der Förderung von Kohle, Erdöl und Uran; die Meeresverschmutzung durch Erdölförderung und bei Tankerhavarien; vermehrte Umweltbelastungen durch den Abbau unkonventioneller Kohlenwasserstoffe sowie die teilweise gravierenden Folgen großer Wasserkraftwerke, insbesondere wenn mit ihrer Errichtung die Überflutung großer Landschaften verbunden ist.

Atomenergie – Risiken größer als der Nutzen

Da mit der Kernspaltung Strom weitgehend CO_2-frei bereitgestellt werden kann, wird Atomenergie – und in ihrem Gefolge oft auch die Kernfusion – häufig als unverzichtbar zur Erreichung der angestrebten CO_2-Reduktionsziele bezeichnet. Diese These ist jedoch bei genauer Betrachtung nicht haltbar: Nur eine lang anhaltende Vermeidung sehr großer Mengen Kohlendioxid macht unter Klimaschutzgesichtspunkten Sinn. Dazu müsste der Beitrag der Atomenergie zur globalen Energieversorgung um mehr als das Zehnfache gesteigert und über Jahrhunderte aufrechterhalten werden. Abgesehen von der Zunahme des Risikos mit jedem neuen Atomkraftwerk (gerade auch in Ländern, deren Sicherheitsstandards und politische Stabilität nicht so hoch sind wie die in Europa) kann dies die Atomenergie schon aus Ressourcengründen nicht leisten. Preiswertes Uran für Leichtwasserreaktoren reicht bereits bei heutiger Nutzung für nur ungefähr 30 Jahre.

Für die großen und über einen sehr langen Zeitraum erforderlichen Mengen an Atomenergiestrom wäre bald der Einstieg in eine Wiederaufbereitungs- und Brüterwirtschaft erforderlich, die nicht nur teurer als die heutigen Reaktoren ist, sondern auch wesentlich risikoreicher. Außerdem macht Wiederaufarbeitung das in den Brennstäben enthaltene Plutonium für Kernwaffen und terroristische Zwecke verfügbar (Proliferation). Aber auch jetzt schon kommt die Atomenergie mit wesentlichen Leitlinien (siehe S. 8) einer nachhaltigen Energieversorgung in Konflikt:

- In Atomreaktoren können Kernschmelzunfälle mit unvertretbar hohen Gefahren für die menschliche Gesundheit und extremen Folgeschäden nicht ausgeschlossen werden.
- Auf allen Stufen der Brennstoffbereitstellung, -nutzung und -entsorgung entstehen radioaktive Stoffe, die teilweise emittiert werden, größtenteils aber unter hohem technischen und logistischen Aufwand für Zehntausende von Jahren von der Umwelt abgeschirmt und überwacht werden müssen. Wie dies geschehen soll, ist bis heute völlig offen. Noch immer ist die Endlagerfrage ungelöst.
- Ein vollkommener Schutz gegen den Missbrauch von Plutonium als Abfallprodukt der Kernspaltung erscheint unmöglich. Eine missbräuchliche waffentechnische Verwendung durch einzelne Staaten oder supranationale Gruppen ist eine ständige Bedrohung für die Menschheit. Ein Kernkraftwerk steht für viele Jahrzehnte und überdauert viele Regierungen.
- Ein völliger Schutz von Atomenergieanlagen gegen äußere Gewaltanwendungen und Sabotage ist nicht möglich oder würde im Einzelfall zu äußerst hohen Kosten und der Einschränkung sozialer Freiräume führen.
- Eine Begrenzung der Atomenergienutzung auf politisch stabile Länder zur Verringerung obiger Risiken behindert die friedliche weltweite Kooperation und ist politisch nicht durchführbar. Dies zeigen die Verhandlungen mit dem Iran zum Bau eines Atomreaktors.

Bei Abwägung dieser Gegebenheiten ist der Nutzen einer kohlenstofffreien Stromerzeugung aus Atomenergie gering im Vergleich zu den Risiken und Gefahren, die inhärent mit der weiteren Nutzung und gar einer Ausweitung der Atomenergie verbunden sind. Glücklicherweise gibt es geeignetere “nichtfossile” Energiequellen in Form der erneuerbaren Energien, deren große technische Potenziale ausreichen, den Weltenergiebedarf um ein Mehrfaches zu decken. Mit dem Mitte 2000 zwischen der Bundesregierung und den Kraftwerksbetreibern geschlossenen Konsens bezüglich der sukzessiven Außerbetriebnahme der Kernkraftwerke ist dies in Deutschland erkannt und im Atomausstiegsgesetz gesetzlich geregelt worden.

Energieverschwender und Energiehabenichtse – ein brisanter Zustand

Ein weiteres gravierendes Nachhaltigkeitsdefizit besteht in dem sehr starken Gefälle des Energieverbrauchs zwischen Industrie- und Entwicklungsländern, das sich in den letzten Jahren eher vergrößert als verringert hat. Derzeit verfügen die 18 % der Weltbevölkerung in den OECD-Ländern über 81 % des weltweiten Bruttosozialprodukts und sind für mehr als die Hälfte des weltweiten Primärenergieverbrauchs und der globalen CO_2-Emissionen verantwortlich. So verbraucht im Durchschnitt ein Bürger der USA nahezu 12-mal mehr Energie

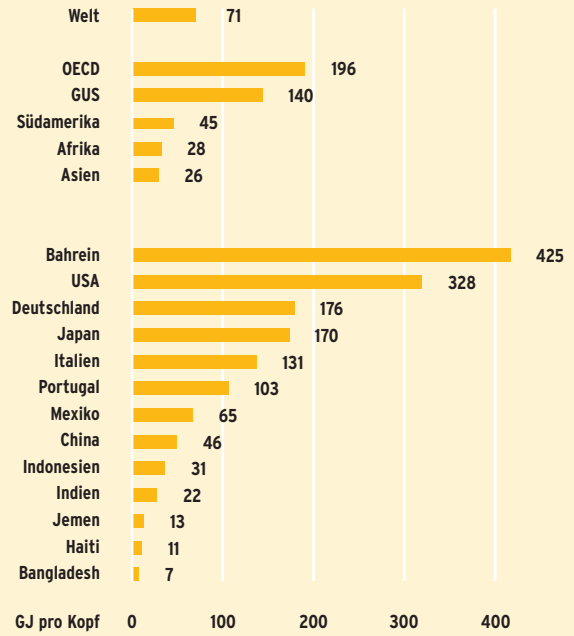
18 % der Weltbevölkerung in den OECD-Ländern verfügen über 81 % des weltweiten Bruttosozialprodukts und sind für mehr als die Hälfte des weltweiten Primärenergieverbrauchs und der globalen CO_2-Emissionen verantwortlich.

pro Kopf als ein Afrikaner und liegt damit um das fast 5-fache über dem globalen Durchschnitt. Die ärmsten Länder wie Jemen, Haiti oder Bangladesh müssen dagegen mit einem Dreißigstel der Energie eines Nordamerikaners auskommen. Die Europäer und Japaner verbrauchen etwa halb soviel Energie pro Kopf wie Nordamerikaner und zeigen damit, dass hoher Energieverbrauch nur in Grenzen etwas mit Wohlstand zu tun hat. Trotzdem liegen sie mit rund 175 GJ pro Kopf und Jahr (entsprechend dem Energiegehalt von 6 Tonnen Steinkohle) noch um das Zweieinhalbfache über dem Weltdurchschnitt.

Geradezu gegensätzlich zum Energieverbrauch sind die Folgen dieses Konsums verteilt. Modellrechnungen zeigen, dass die voraussichtlich am stärksten von den Folgen möglicher Klimaänderungen betroffenen Regionen solche sein werden, die am wenigsten zu ihrer Verursachung beigetragen haben und die diesen Folgen am wenigsten mit technischen und finanziellen Mitteln entgegenwirken können. Das verschärft die sozialen und wirtschaftlichen Konflikte weiter.

Ein auch nur tendenzieller Ausgleich der gravierenden Unterschiede im Energieeinsatz, der wegen der Forderung nach sozialer Nachhaltigkeit unbedingt notwendig ist, führt in Verbindung mit dem Anwachsen der Weltbevölkerung auf neun bis zehn Milliarden Menschen bis 2050 unvermeidlich zu einem weiteren Wachstum der globalen Energienachfrage. Da Art und Höhe der Energieversorgung in den Industrieländern wegen des hier erreichten Wohlstandes ärmeren Ländern als Vorbild dient, bewegt sich derzeit die Entwicklung in diesen Staaten in die gleiche ressourcenverzehrende Richtung, wie wir sie lange Zeit eingeschlagen haben. Und vergrößert die schon bestehenden Nachhaltigkeitsdefizite weiter. Nur wenn die westlichen Gesellschaften vorbildhaft zeigen, dass ein Leben in Wohlstand auch ohne hohen CO_2-Ausstoß möglich ist, besteht eine Chance, die aus Klimaschutzgründen problematischen fossilen Energieträger zurückzudrängen und den Anstieg des globalen Energieverbrauchs zu bremsen. Studien zeigen, dass sowohl in Deutschland als auch global ein solcher Weg gegangen werden kann.

→ **Energieverbrauch pro Kopf**



Quelle: UN 2007

Energieverbrauch pro Kopf im internationalen Vergleich

Wege zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Eine völlig objektive Abwägung zwischen den Gefahren des Klimawandels, den zu erwartenden Verknappungs- und Verteuerungstendenzen der fossilen Rohstoffe, den unterschiedlichen Meinungen zu den Risiken der Atomenergie und den volkswirtschaftlichen und sozialen Schäden, die durch den extrem unausgewogenen Zugang zu Energie entstehen, erscheint aus heutiger Sicht nicht möglich. Aus den vorliegenden Erkenntnissen können jedoch prinzipielle Schlüsse gezogen werden: Die zukünftige Energieversorgung darf sich nicht weiterhin beinahe ausschließlich auf fossile und auf nukleare Energieträger stützen. Vielmehr muss ein System etabliert werden, das den acht Leitlinien einer nachhaltigen Energieversorgung möglichst nahe kommt (siehe S. 8) und eine stetige und zügige Annäherung an sie erlaubt. Für eine Umgestaltung der Energieversorgung in diese Richtung gibt es drei zentrale Strategieelemente, die in der Nachhaltigkeitsdiskussion mit **Effizienz**, **Konsistenz** und **Suffizienz** bezeichnet werden (siehe Kasten auf der folgenden Seite).

Keine dieser drei Strategien kann für sich allein in Anspruch nehmen, der erfolgversprechendste Weg zu sein. Vielmehr ergänzen sie sich und führen erst in einer engen Wechselwirkung zum Ziel. Ein deutlich verminderter Energieverbrauch ist eine wesentliche Voraussetzung, damit erneuerbare Energien rasch genug nennenswerte Anteile des Energiebedarfs decken können. Und ohne gleichzeitig energiebewusster zu leben, kann sich kein Erfolg durch den Einsatz effizienter Technolo-

Zentrale Strategieelemente einer nachhaltigen Energiewirtschaft

→ **Effizienz:**

Gewünschte Energiedienstleistungen sind beispielsweise ein angenehmes Raumklima, warmes Wasser, ein beleuchteter Raum, funktionsfähige Maschinen oder die Möglichkeit der Fortbewegung von A nach B. Vom Energierohstoff zur Dienstleistung durchlaufen die Energieträger mit Verlusten behaftete Wandlungsschritte. Diese Verluste können nach heutiger Erkenntnis mit intelligenter Technik und gutem Energiemanagement noch erheblich reduziert werden. Neben einer wesentlich rationelleren Energiewandlung und -verwendung in allen Aggregaten und Geräten gehört auch die Vermeidung von Energieeinsatz (wie durch eine starke Verminderung von Raumheizung durch sehr gute Wärmedämmung) und der Ersatz von hochwertigen durch weniger "wertvolle" Energieträger dazu.

→ **Konsistenz:**

Hier geht es im Wesentlichen um die Substitution des mit den Nachhaltigkeitszielen unverträglichen Verbrauchs fossiler Energierohstoffe zugunsten der Nutzung der vorhandenen natürlichen, durch Sonnenenergie, Gravitation und Erdwärme angetriebenen Energiekreisläufe und um die Vermeidung des Aufbaus anderer risikoreicher Energiesysteme.

→ **Suffizienz:**

Die Höhe des Energieeinsatzes hängt auch von Lebensstilen und Konsumgewohnheiten ab. Ändern sich menschliche Aktivitäten und Bedürfnisse, etwa im Freizeitverhalten, so kann dies erheblichen Einfluss auf den resultierenden Energieverbrauch haben. Die Skala des eigenverantwortlichen Handelns ist dabei sehr groß, sie kann von bewusstem Verzicht auf energieintensive Produkte, Fleischkonsum oder übertriebene Mobilität bis zur klugen Auswahl von Nahrungsmitteln oder Verkehrsmitteln reichen. Aus der Erkenntnis, dass die Gewohnheit des "immer weiter, immer schneller, immer mehr" auf Dauer nicht nachhaltig ist, könnte in den Industrieländern ein Wertewandel einsetzen, der ein "lieber besser leben als mehr haben" zum Ziel hat.

gien einstellen. Auf der anderen Seite wird es mit jeder eingesparten Einheit Energie schwieriger, weitere Energie einzusparen. Eine Null-Energie-Gesellschaft ist nicht vorstellbar, nachhaltig nutzbare Energieströme, also erneuerbare Energien, sind daher notwendig. Eine deutlich effizientere Energienutzung aller Energieträger und die Substitution endlicher Energieressourcen durch erneuerbare Energien sind zwei Seiten einer Medaille. Parallel dazu sollte auch ein **Bewusstseins- und Wertewandel** stattfinden, der weg vom stetig wachsenden Güterkonsum und hin zu einem qualitativen Wachstum der Bedürfnisbefriedigung führt und die Sensibilität für die Umwelt schärft. Eine derartige Veränderung wird aber, wenn überhaupt, nur über längere Zeiträume größere Teile der Bevölkerung erfassen. Vor allem die fortschreitende Globalisierung auch des Konsumverhaltens und die starke Ausrichtung auf sehr kurzfristige wirtschaftliche Erfolge statt auf vorsorgeorientierte, längerfristig angelegte Reformen stehen solchen Tendenzen im Wege. Es sind noch eine Vielzahl von "sozialen Innovationen" notwendig, damit ein bewussterer Umgang mit den natürlichen Ressourcen zur Selbstverständlichkeit wird.

Innovationsmotor erneuerbare Energien

Über die Höhe künftig möglicher Effizienzsteigerungen und die Bedeutung der CO_2-Rückhaltung bei fossilen Kraftwerken wird noch gestritten. Klar ist, dass eine deutliche Steigerung des Beitrags erneuerbarer Energien unverzichtbar ist, um auf einen nachhaltigen Energiepfad einzuschwenken. Die erneuerbaren Energien sind somit verlässliche Garanten für eine zukunftsfähige Energieversorgung.

Über Jahrtausende hat der Mensch ausschließlich diese erneuerbaren Energien genutzt, allerdings auf einem sehr niedrigen Niveau und mit sehr geringen Wirkungsgraden. Gegenüber unseren Vorfahren haben wir heute immense Vorteile: Uns stehen Technologien zur Verfügung, mit denen aus erneuerbaren Energiequellen Energiedienstleistungen auf ebenso hohem Niveau angeboten werden können, wie es die moderne Industriegesellschaft von der fossil-nuklearen Energieversorgung gewöhnt ist. Auch die Kosten hierfür sind erschwinglich; zumal, wenn diese Technologien in großtechnischem Maßstab eingesetzt und alle Kostensenkungspotenziale ausgeschöpft werden. Ferner gilt es, die "Kosten" in Relation zu den ökologischen und sozialen "Qualitäten" dieser Energieformen zu setzen, also die durch eine auf fossilen und nuklearen Energiequellen verharrende

Erneuerbare Energien sind verlässliche Garanten für eine zukunftsfähige Energieversorgung.

Energieversorgung verursachten Umwelt- und Folgeschäden in das ökonomische Kalkül einzubeziehen (siehe Kasten “Externe Kosten – wie man Energiekosten richtig bestimmt”). Dann stellt sich heraus, dass erneuerbare Energien alle wesentlichen Anforderungen an eine zukunftsfähige Energieversorgung erfüllen können.

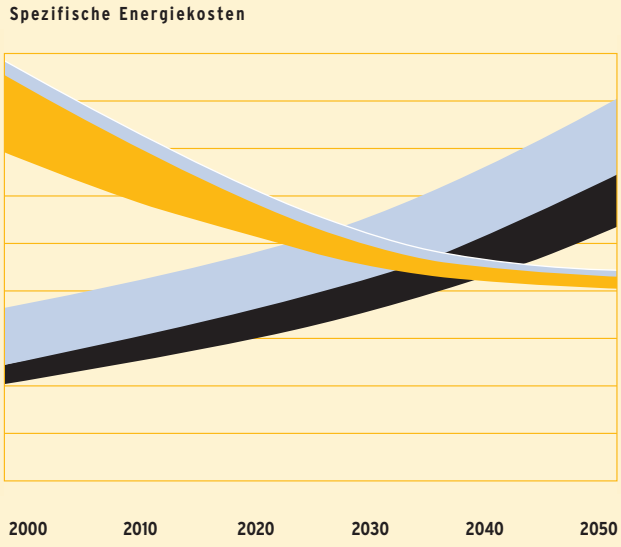
Ein besonderes Kennzeichen erneuerbarer Energien stellt die Vielfalt der einsetzbaren Energiequellen und -technologien und der enorme Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu Hunderten von Megawatt dar. Sie können sowohl an jegliche Art von erforderlicher Energiedienstleistung angepasst werden als auch in enger Verzahnung mit modernen Energietechniken die erforderliche Versorgungssicherheit zu jeder Zeit und an jedem Ort gewährleisten. Kennzeichnend für eine derartige Energieversorgung ist die zunehmende Vernetzung auf dezentraler Ebene (siehe S. 53), in der sich erneuerbare Energien hervorragend einbinden lassen. Außerdem können großräumige interkontinentale Netzverbunde das regional sehr unterschiedliche Angebot erneuerbarer Energien optimal miteinander verknüpfen. Über die jeweilige landesspezifische “dezentrale” Nutzung von erneuerbaren Energien hinaus werden zukünftig an Orten mit sehr reichhaltigem und damit kostengünstigem Energieangebot energie-industrielle Zentren entstehen, die Regionen mit großer Energienachfrage über Hochspannungsleitungen oder (Was-

Wie erneuerbare Energien zur Nachhaltigkeit beitragen

- Erneuerbare Energien leisten einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz – im Jahr 2008 haben sie allein in Deutschland den Ausstoß von rund 112 Millionen Tonnen des Klimagases CO_2 verhindert: 15 % der gesamten CO_2-Emissionen Deutschlands.
- Erneuerbare Energien erweitern die Rohstoffvielfalt, machen unabhängig von fossilen Rohstoffen und tragen so zur Versorgungssicherheit und zur Vermeidung von Rohstoffkonflikten bei.
- Erneuerbare Energien sichern uns gegen Kostensteigerungen ab, die bei knappen fossilen und nuklearen Ressourcen unvermeidbar eintreten werden.
- Erneuerbare Energieanlagen können am Ende ihrer Lebensdauer einfach abgebaut und recycelt werden. Sie sind keine strahlende Altlast – wie Atomkraftwerke – und hinterlassen keine Kohlegruben.
- Erneuerbare Energien sind vielfach heimische Energieträger, die zur regionalen Wertschöpfung beitragen und Arbeitsplätze sichern.
- Erneuerbare Energien vereinfachen den Zugang großer Bevölkerungsteile zu Energie, beispielsweise durch ländliche Elektrifizierung in Entwicklungsländern, und können diesen Ländern Wege aus der Armut weisen.

→ Kostenverlauf erneuerbarer und herkömmlicher Energien

Quelle: DLR



Erneuerbare Energien
- junge Technologien; Technologiefortschritt und Kostendegression groß
- unbegrenzte, großräumige Verfügbarkeit
- global einsetzbar, nicht missbrauchsfähig, nahezu keine Gefährdungen
- externe Kosten gering (Anlagenherstellung)

Fossile und nukleare Energien
- begrenzte Ressourcen, regionale Ungleichverteilung
- Preise längerfristig steigend
- nukleare als Ersatz für fossile Energien verlangen teure und risikoreiche Systeme (Brüter)
- nukleare Energien kaum global einsetzbar; Gefahr von Missbrauch und Risiken ist hoch
- externe Kosten: fossile Energien langfristig prohibitiv (Klima); nukleare Energien potenziell prohibitiv

Erneuerbare Energien
Fossile und nukleare Energien
Externe Kosten

Erneuerbare Energiequellen liefern auf Dauer die kostengünstigste Energie.

→ Externe Kosten – Wie man Energiekosten richtig bestimmt

Die durch Energiewandlung und -nutzung verursachten Schäden können unter Umständen zu erheblichen volkswirtschaftlichen Kosten führen. Da diese Kosten nicht vom Verursacher getragen werden und sich auch nicht in den Marktpreisen für Strom, Wärme und Kraftstoffe widerspiegeln, werden sie als externe Kosten bezeichnet. Solche externen Effekte führen – in der Sprache der Ökonomen – zu einer nicht-optimalen Zuteilung (Allokation) knapper Ressourcen und die Umwelt wird über das optimale Maß hinaus in Anspruch genommen.

Eine einfache Lösung wäre die "Internalisierung", also die Übertragung aller relevanten Folgekosten auf den Verursacher. Dies kann durch Umweltsteuern, Abgaben, handelbare Emissionsrechte oder ähnliche Instrumente erreicht werden. Problematisch ist dabei die genaue Erfassung der Umweltschäden und deren ökonomische Bewertung. Trotz zum Teil erheblicher Unsicherheiten ist es mit wissenschaftlichen Modellen möglich, die Auswirkungen von Luftschadstoffen auf Materialien, die Wirkungen auf die menschliche Gesundheit (von leichten Atemwegssymptomen bis hin zu einem erhöhten Sterblichkeitsrisiko) oder die Versauerung und Überdüngung von Ökosystemen quantitativ abzuschätzen.

Große Anstrengungen wurden in den letzten Jahren unternommen, um auch die durch den Klimawandel verursachten Schäden abzuschätzen. Dies zeigt eindrücklich, welche Schäden durch den Klimawandel auf uns zukommen. Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Schadenskosten durch den Treibhauseffekt sind jedoch besonderes groß und lassen bis heute eine zuverlässige monetäre Bewertung der zum Teil unbekannten Folgen nicht zu. Die Werte spannen eine Bandbreite von mehreren Größenordnungen auf. Es zeichnet sich ab, dass nach heutigem Wissen Werte um 70 Euro pro Tonne CO_2 eine plausible Größenordnung für die Schadenskosten des Klimawandels sein dürften. Da die Folgen des Klimawandels noch nicht vollständig verstanden werden, können die Kosten aber auch deutlich höher sein.

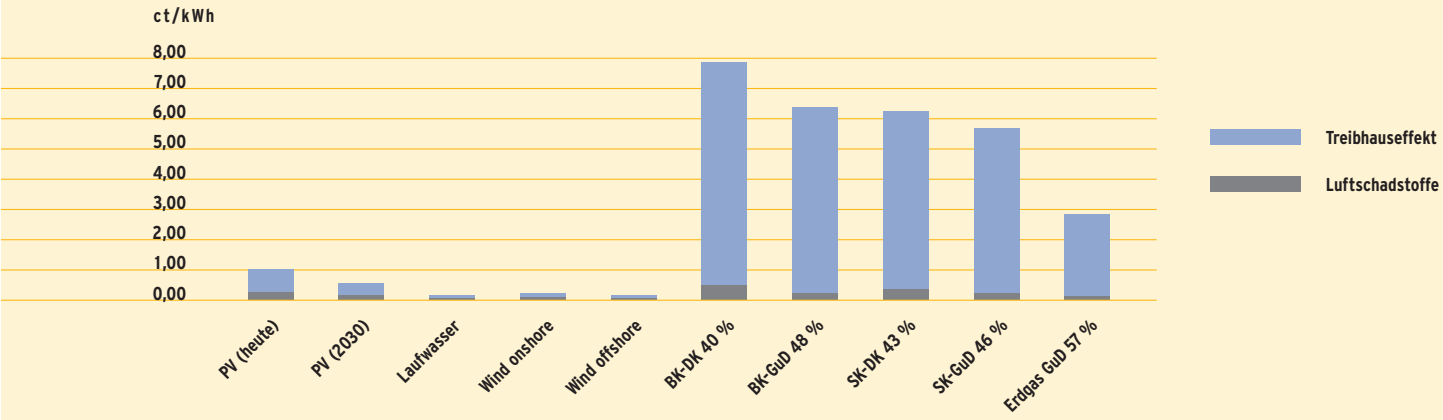
Die Internalisierung der Schäden verteuert die Kosten fossiler Energieträger erheblich. Die Berechnung externer Kosten der Atomenergienutzung ist vor allem wegen der umstrittenen Bewertung großer Unfälle und der extrem langen Belastung durch radioaktive Abfälle schwierig und führt je nach Annahmen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen.

Im Gegensatz dazu entstehen bei den erneuerbaren Energieträgern nur Umweltschäden durch die geringen Emissionen aus dem Fertigungsprozess der Anlagen. Die externen Kosten sind dabei für Photovoltaik mit 0,8 Cent/kWh am höchsten, werden aber durch eine Verbesserung der Technologie und der bei der Anlagenherstellung eingesetzten Energieprozesse sinken (siehe Grafik "Externe Kosten").

Das zeigt, dass wir heute bei der Ermittlung der "kostengünstigsten" Energieversorgung von unzulänglichen Voraussetzungen ausgehen. Fossile und nukleare Energien sind teurer, als es die betriebswirtschaftliche Rechnung zeigt. Je effektiver die externen Kosten in das Preiskalkül einbezogen werden, desto früher wird eine Umgestaltung der Energieversorgung auch aus ökonomischer Sicht attraktiv. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz kann als "Vorwegnahme" der fälligen Korrektur der Energiepreise angesehen werden. Dann sind die Strompreiskorrekturen nach diesem Gesetz ein Ausgleich für nicht internalisierte externe Kosten anderer Energieträger.

→ Externe Kosten der Energiesysteme

Quelle: DLR 2006



Externe Kosten verschiedener Energiesysteme durch Luftschadstoffe und Treibhausgase.

serstoff-) Pipelines mit Energie versorgen. So können alle "Reservoire" erneuerbarer Energien kostengünstig "angezapft" und genutzt werden. Diese Zentren können gleichzeitig zu Keimzellen wirtschaftlicher Entwicklung und damit von zunehmendem Wohlstand und einer Stabilisierung sozialer Strukturen werden. Da die meisten dieser Zentren in heute eher wenig entwickelten Regionen wie Nordafrika liegen, geht mit einer Mobilisierung erneuerbarer Energien eine positive Entwicklung der betreffenden Länder einher. Solche zentralen Infrastrukturen ersetzen gleichwohl eine dezentrale Entwicklung erneuerbarer Energien nicht, sondern ergänzen sie nur. Denn erneuerbare Energiepolitik hat gerade bei dezentralen Entwicklungen besonders erfolgreich gewirkt. Der Ausbau neuer zentraler Strukturen hingegen erfordert einen internationalen Politikprozess und ist entsprechend schwerfälliger – zu schwerfällig, als dass wir uns allein auf diese Versorgungsoption verlassen könnten.

DIE ÖKOLOGISCHEN QUALITÄTEN DER ERNEUERBAREN ENERGIEN

2008 haben erneuerbare Energieanlagen 112 Millionen Tonnen klimaschädliches Kohlendioxid eingespart. Würden wir die erneuerbaren Energien nicht nutzen, so lägen die energiebedingten CO_2-Emissionen in Deutschland rund 13 % höher.

Wir haben gesehen: Noch weist unser Energiesystem zahlreiche Nachhaltigkeitsdefizite auf, insbesondere im ökologischen Bereich. Die Energieversorgung basiert auf Energieträgern, deren Reichweite begrenzt ist. Sie belastet Atmosphäre, Böden und Gewässer mit Schadstoffen und Treibhausgasen. Und nicht nur das: Leckagen in Ölpipelines, Tankerhavarien und flächenzehrender Kohleabbau, eine ungelöste Entsorgungsfrage des Atommülls und die Möglichkeit von Reaktorunfällen: Die Liste der Umweltprobleme im Energiebereich ist lang.

Neben einem vorsichtigen und sparsamen Umgang mit unseren Energieressourcen (siehe Infobox "Effizienz und Sparen – eine notwendige Voraussetzung für eine optimale Nutzung erneuerbarer Energien") verspricht der Einsatz von erneuerbaren Energien Abhilfe in vielen Bereichen. Die erneuerbaren "Brennstoffe" sind die natürlichen Energieströme der Sonne und des Windes, die Energie des fließenden Wassers und der Wellen, der Energieinhalt von Biomasse und Erdwärme. Ihre Nutzung verhindert, dass weiterhin fossile oder nukleare Energievorräte auf unserer Erde verbraucht werden müssen. Gleichwohl muss auch der Ausbau erneuerbarer Energien mit den strengen Kriterien einer umweltverträglichen Energieumwandlung geprüft werden.

Klima- und Ressourcenverträglichkeit erneuerbarer Energien

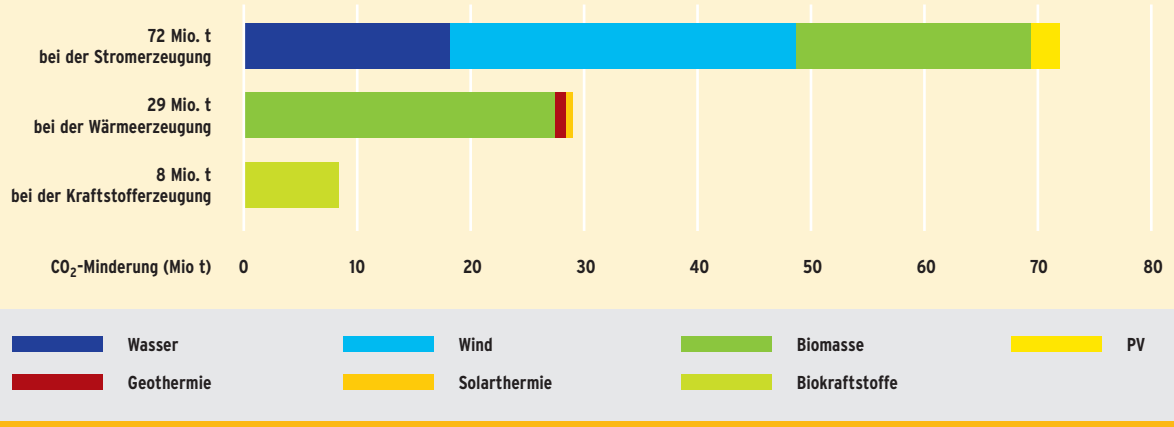
In den "Brennstoffen" der erneuerbaren Energie aus Wind, Sonne, Wasserkraft und Erdwärme steckt kein fossiles Kohlenstoffatom, das bei der Verbrennung zu klimaschädlichem CO_2 oxidiert wird. Und bei der Nutzung nachhaltig angebauter Biomasse entsteht zwar Kohlendioxid, doch bei der Bildung der Biomasse wurde die gleiche Menge des Treibhausgases der Atmosphäre entzogen. Weil der Kohlenstoffkreislauf geschlossen ist, wird auch hier kein zusätzliches Treibhausgas emittiert. Erneuerbare Energien sind daher nicht nur ressourcen-, sondern auch klimaverträglich. Allein im Jahr 2008 hat ihre Nutzung den CO_2-Ausstoß um rund 109 Mio. t vermindert. Anders ausgedrückt: Würden wir erneuerbare Energien nicht nutzen, lägen die energiebedingten CO_2-Emissionen in Deutschland rund 15 % höher. Die Klimaschutzverpflichtungen der Bundesregierung lassen sich ohne die Erneuerbaren nicht erfüllen.

Dabei fällt auf, dass der Beitrag der erneuerbaren Energien am Klimaschutz wesentlich größer ist als ihr Anteil am Energieverbrauch. Dies hängt damit zusammen, dass die Erneuerbaren vor allem zur Stromproduktion genutzt werden und hier vor allem Kohle ersetzen - einen Brennstoff, der im Vergleich mit Mineralölproduktion und Erdgas mit einem besonders hohen CO_2-Faktor behaftet ist. Der Effekt im Strommarkt ist aber auch deswegen besonders hoch, weil die Wirkungsgrade von Kraftwerken deutlich geringer sind als bei Wärme erzeugenden Systemen. Von der gesamten CO_2-Vermeidung erneuerbarer Energien entfallen deshalb trotz geringerer Energiemengen etwa 72 Mio. t auf die Stromerzeugung und "nur" 29 Mio. t auf die Wärmebereitstellung (Abbildung "CO_2-Vermeidung durch die Nutzung erneuerbarer Energien"). Im Kraftstoffmarkt sind es rund 8 Mio. t.

Diese Berechnungen berücksichtigen bereits die notwendigen Aufwendungen, um etwa Wind- und Solar-

→ Vermeidung von CO_2-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien

Quellen: AGEE-Stat/BMU



Die CO_2-Vermeidung durch die erneuerbaren Energien lag in Deutschland im Jahr 2008 bei rund 109 Mio. Tonnen.

anlagen zu errichten, zu betreiben und nach ihrer Nutzung auch wieder zu demontieren – also den gesamten Lebenszyklus der Energieanlagen. Die Treibhausgas-Emissionen, die mit dem Lebenszyklus verbunden sind, liegen für die Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien – sieht man von der Photovoltaik ab – deutlich unter 100 Gramm pro bereitgestellter Kilowattstunde Nutzenergie (siehe Grafik "Treibhausgas-Emissionen in der Strom- und Wärmeerzeugung"). Beim Einsatz von Biomasse in Heizkesseln, Dampfturbinen oder Blockheizkraftwerken schwanken die Werte je nach Anbau und Ernte des Holzes zwischen 20 und 75 g/kWh Nutzenergie. Gas- und Ölkessel oder Kohlekraftwerke liegen im Vergleich dazu um etwa den Faktor Zehn höher.

Lediglich fossile Kraftwerke, die das entstehende Kohlendioxid auffangen und in geeigneten Speichern entsorgen, kommen auf niedrigere Werte. Die Ausrüstung moderner Kraftwerke mit CO_2-Abtrennung und -Speicherung – dies wird auch als Carbon Capture and Storage bezeichnet – erhöht allerdings die Kosten der Kraftwerke. Die Abtrennung ist außerdem mit einem erheblichen Energiebedarf verbunden. Der Wirkungsgrad sinkt, die Stromkosten aus solchen Kraftwerken steigen signifikant an. Bei der Auswahl der geeigneten CO_2-Speicher (beispielsweise ausgediente Gasfelder oder tiefe Grundwasserseen) muss außerdem eine maximale Dichtigkeit gewährleistet sein – eine zu hohe Leckage des eingespeicherten CO_2 würde die langfristige Klimaschutzwirkung von CCS konterkarieren.

Beim Einsatz von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen zur Strom- und Wärmebereitstellung betragen die mit dem Lebenszyklus verbundenen Treibhausgas-Emissionen zwischen 20 und 200 g/kWh$_{el}$, je nachdem, wie gut die Wärme tatsächlich genutzt wird. Der niedrige Wert ergibt sich bei einer fast vollständigen Wärmenutzung, der hohe, wenn bloß 20 % eingesetzt werden können. Außerdem werden diese Werte nur erreicht, wenn die Biogasanlagen dem Stand der Technik entsprechen. Ist dies nicht der Fall können die Treibhausgas-Emissionen bis zu 360 g/kWh$_{el}$ betragen. Die Treibhausgas-Emissionen fossiler Stromerzeugung sind dagegen deutlich höher und liegen bei einem modernen Steinkohlekraftwerk über 800 g/kWh. Biogasanlagen, die tierische Exkremente nutzen, bringen sogar zusätzlich zur Strom- und Wärmeerzeugung einen Klimanutzen, weil sie durch die Nutzung des Biogases Methanemissionen vermeiden, die ansonsten bei der Lagerung der Gülle entstanden wären. Daher weisen sie in der Abbildung "Treibhausgas-Emissionen in der Strom- und Wärmeerzeugung" negative Emissionen auf.

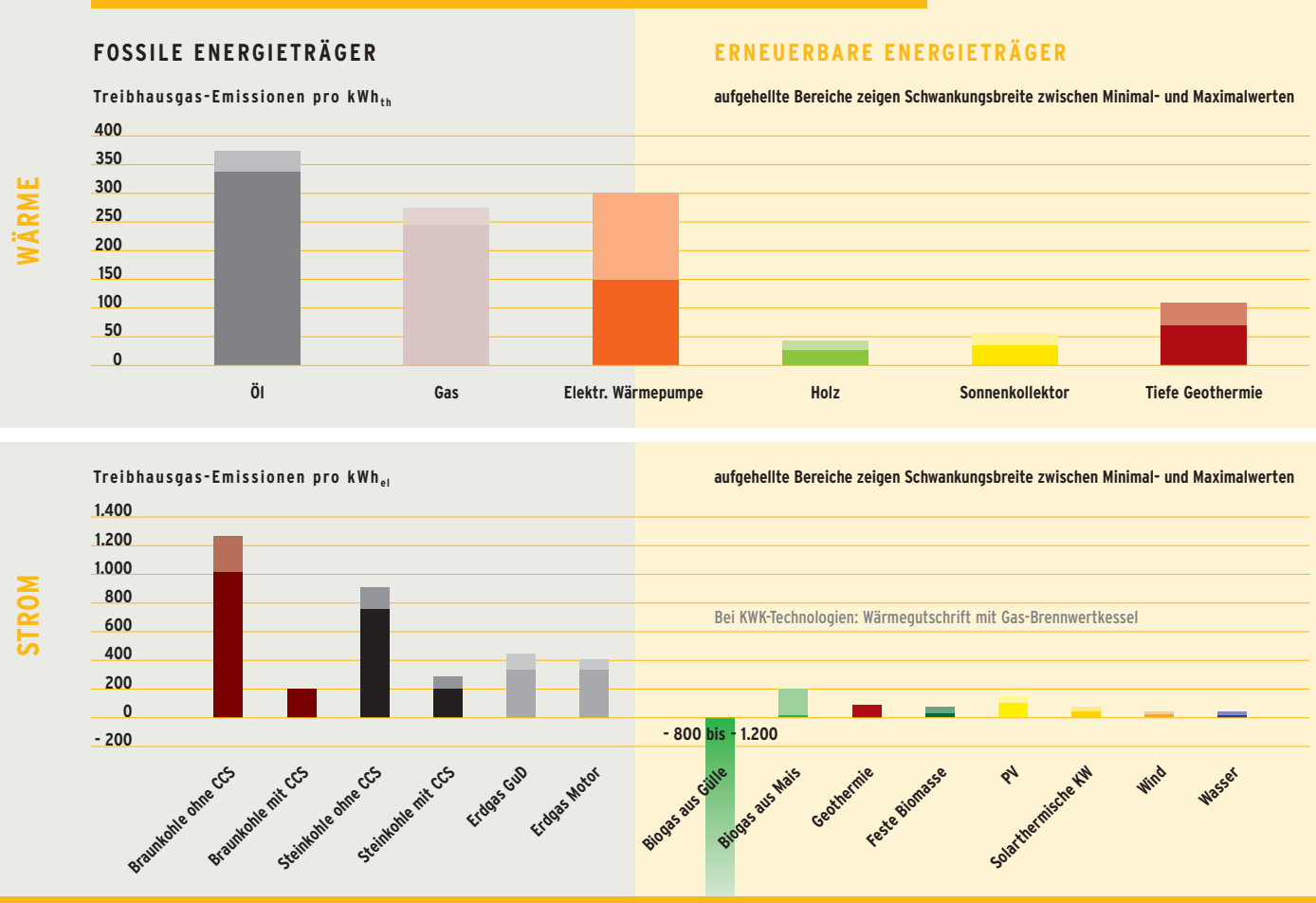
Das Beispiel der Photovoltaik zeigt zugleich, wie wichtig es ist, nicht nur den heutigen Stand, sondern auch die Entwicklungspotenziale der Technologien zu analysieren. Während die Herstellung der Photovoltaik heute noch mit – je nach Typ und Standort – 100 bis 150 g Treibhausgas-Emissionen pro kWh Strom zu Buche schlägt, können neue Solarzellentypen (siehe S. 79), höhere Wirkungsgrade, verbesserte Herstellungsverfahren und neuartige Materialien diese Emissionen drastisch senken. Wird zudem berücksichtigt, dass die Energieversorgung der Zukunft höhere Anteile erneuerbarer Energien aufweist, so sinken die Treibhausgas-Emissionen aus der Herstellung der Anlagen weiter ab, da zur Anlagenherstellung dann auch emissionsarme Energie eingesetzt wird.

Man kann den Vergleich zwischen fossilen und erneuerbaren Energieanlagen auch mit einer anderen Kennzahl verdeutlichen: der energetischen Amortisationszeit, also der Zeit, die ein Energiesystem benötigt, um die Energie bereitzustellen, die zu seiner Herstellung, zum Betrieb und zur Entsorgung eingesetzt worden ist.

Die **energetische Amortisationszeit** (siehe Tabelle "Energetische Amortisationszeit") für die reine Anlagenherstellung liegt für fossil gefeuerte Kraftwerke und für Kernkraftwerke bei zwei bis drei Monaten Betriebszeit.

→ Treibhausgas-Emissionen in der Strom- und Wärmeerzeugung

Quelle: IFEU



Fossile Energiebereitstellung (ohne CO_2-Abtrennung und Speicherung/CCS) ist eine Größenordnung klimaschädlicher als erneuerbare Energie.

Erneuerbare Energieanlagen haben sich in kürzester Zeit energetisch amortisiert. Fossile Kraftwerke amortisieren sich nie.

Aber bezogen auf den gesamten Betrieb amortisieren sich diese Anlagen nie, denn es muss immer mehr Energie in Form von Brennstoffen hineingesteckt werden, als man hinterher als Nutzenergie erhält! Für eine Kilowattstunde Strom muss beispielsweise ein typisches Braunkohlekraftwerk Kohle mit einem Energiegehalt von rund 2,5 Kilowattstunden verbrennen.

Wasser-, Wind- und solarthermische Kraftwerke benötigen zwischen drei und dreizehn Monate, bis sie ihre Herstellungsenergie wieder eingespielt haben. Danach liefert jede Betriebsstunde den wertvollen Strom "ökologisch kostenlos". Die **Solarzellenherstellung** ist energetisch aufwändiger. Heutige Anlagen mit kristallinem Silizium haben in unseren Breiten energetische Amortisationszeiten von einigen Jahren, ihre Lebensdauer ist jedoch um ein Vielfaches höher. Man erwartet durch weitere Fortschritte in der Fertigungs- und Solarzellentechnologie eine Verringerung dieses Wertes auf ein bis zwei Jahre innerhalb des nächsten Jahrzehnts.

Ähnliche Verhältnisse liegen bei der Wärmeerzeugung vor. **Solare Kollektoranlagen** brauchen zwischen 18 und 30 Monaten, Anlagen mit hydrothermaler Erdwärmenutzung nur sieben bis zehn Monate. Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energien holen also im Laufe ihrer Betriebszeit ein Vielfaches der Energie wieder herein, die zu ihrer Herstellung erforderlich war – ganz im Gegensatz zu fossil gefeuerten Anlagen und auch Kernkraftwerken.

CO_2-Vermeidungskosten

Langfristiges Ziel der Klimaschutzpolitik ist es, die weltweiten Treibhausgas-Emissionen um 80 % zu senken. Dieses Ziel sollte "effizient" erreicht werden, also zu möglichst geringen Kosten. Als Maß für die Effizienz von Minderungsmaßnahmen werden oft die CO_2-Vermeidungskosten herangezogen, das sind die Aufwendungen, die durch den Einsatz einer bestimmten Technologie zur Reduk-

tion von CO_2-Emissionen entstehen. Eine wichtige Vereinbarung zur Berechnung von CO_2-Vermeidungskosten ist die Festlegung eines Bezugs, gegenüber dem die jeweiligen Kosten für die Emissionsminderung ausgewiesen werden. Als Bezugsgröße zur Darstellung der CO_2-Vermeidungskosten durch Strom aus erneuerbaren Energien werden hier die Stromerzeugungskosten und CO_2-Emissionen neuer fossiler Dampfkraftwerke herangezogen, außerdem wird ein moderater Anstieg der Brennstoffkosten unterstellt. Für die Ermittlung der CO_2-Minderungskosten durch Wärme aus erneuerbaren Energien wird die Wärmebereitstellung in Einfamilienhäusern durch einen Mix aus Öl- und Gas angenommen.

Der Bandbreite der Strom- und Wärmegestehungskosten entsprechend spannen auch die CO_2-Vermeidungskosten einen großen Kostenbereich mit zum Teil heute noch beträchtlichen Vermeidungskosten auf (siehe Grafik "CO_2-Vermeidungskosten"). Für eine vorausschauende Politik ist es besonders wichtig, die zeitliche Dynamik zu berücksichtigen: Während die CO_2-Vermeidungskosten für die Stromerzeugung aus Wind, Geothermie, solarthermischen Kraftwerken und Biomasse heute noch zwischen 40 und 100 Euro/t CO_2 liegen, gehen sie bis 2030 wegen der sinkenden Kosten für Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien und steigender fossiler Brennstoffpreise deutlich zurück. Langfristig werden zum Teil sogar negative CO_2-Vermeidungskosten erreicht. Das bedeutet: wir sparen Klimagase und Geld zugleich.

Die Höhe der Vermeidungskosten für Strom aus einem Biomasse-Heizkraftwerk hängt von den Brennstoffkosten und der Wärmevergütung ab. Wegen der heute noch hohen Stromerzeugungskosten liegen die CO_2-Vermeidungskosten der Photovoltaik bei rund 700 Euro/t CO_2, sinken aber langfristig auf ca. 60 Euro/t CO_2.

Auch die CO_2-Vermeidungskosten der Wärmebereitstellung mit Solarkollektoren liegen heute noch in der Größenordnung von 700 Euro/t CO_2. Allerdings besteht auch hier ein großes Potenzial zur Kostensenkung, so dass je nach Einsatzgebiet und Anlagenkonfiguration langfristig auch mit Solarkollektoren negative CO_2-Vermeidungskosten erreicht werden können. Die CO_2-Vermeidungskosten der Wärme aus Biomasse hängen von der Entwicklung der Brennstoffkosten ab. Heute liegen sie bei circa 40 Euro/t CO_2. Die Wärmeerzeugung in einem Holzhackschnitzel-Heizwerk führt schon heute zu negativen CO_2-Vermeidungskosten.

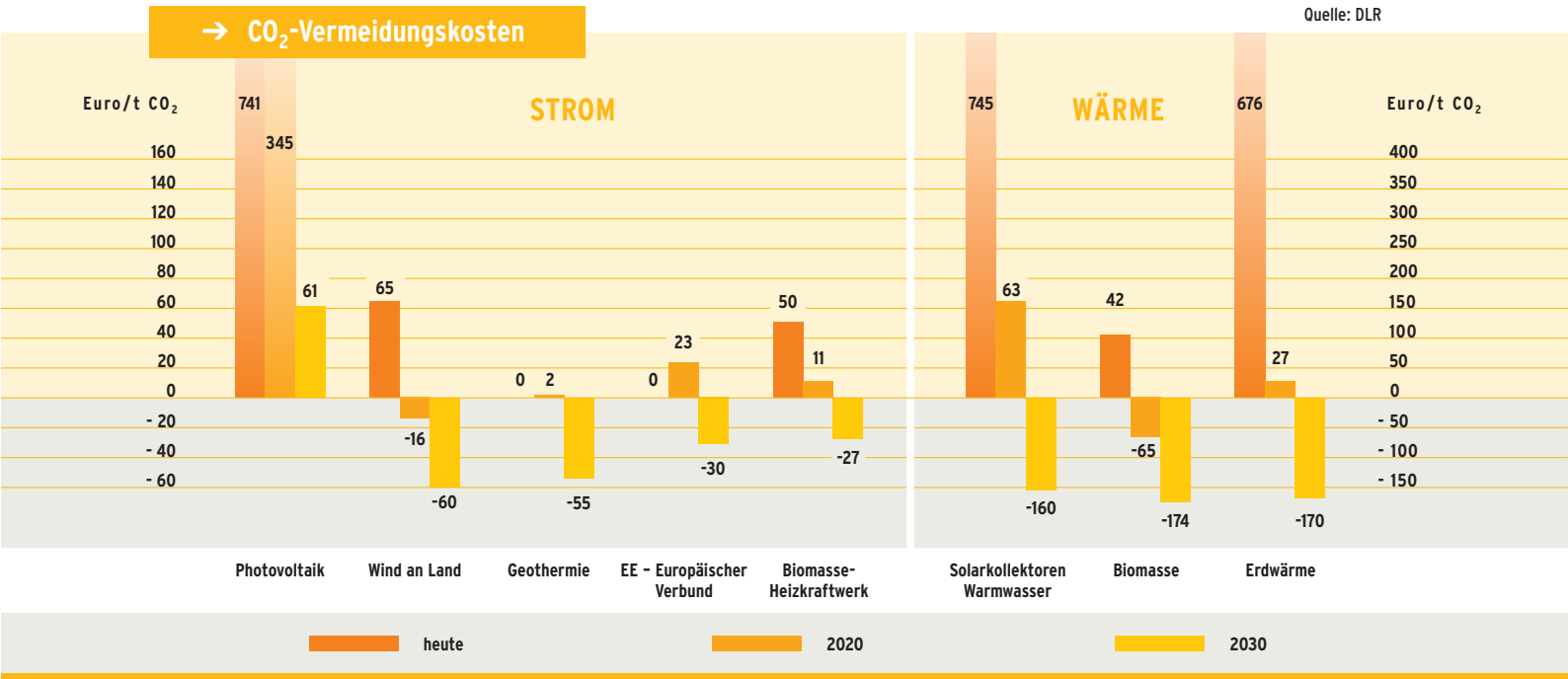
Vielfach wird argumentiert, die CO_2-Vermeidung durch Modernisierung von Kohlekraftwerken habe viel geringere CO_2-Vermeidungskosten. Während durch neue Steinkohlekraftwerke zunächst noch ein gegenüber dem heutigen Bestand an Steinkohlekraftwerken bestehendes CO_2-Minderungspotenzial zu sehr niedrigen Kosten erschlossen werden kann, so ist jede darüber hinaus gehende zusätzliche Minderung der CO_2-Intensität mit stark steigenden CO_2-Vermeidungskosten verbunden. So führt bereits der Sprung von einem Dampfkraftwerk mit 45 % Wirkungsgrad hin zu einem verbesserten Dampfkraftwerk mit 46 % Wirkungsgrad, zusammen mit einem leichten Anstieg des Kohlepreises, zu CO_2-Minde-

Quelle: IFEU

→ Energetische Amortisationszeit für Herstellung, Betrieb und Entsorgung

Stromerzeugung	
Windkraft	3 bis 7 Monate
Wasserkraft	9 bis 13 Monate
Solarthermisches Kraftwerk in Marokko	3 bis 7 Monate
Photovoltaik in Mitteleuropa	
• Polykristallines Silizium, moderne Herstellungstechnologie	3 bis 5 Jahre
• Dünnschicht-Zellen	2 bis 3 Jahre
Gaskraftwerk	Nie *
Kohlekraftwerk	Nie *
Atomkraftwerk	Nie *
Wärmeerzeugung	
Sonnenkollektoren	1,5 bis 2,5 Jahre
Geothermie (hydrothermal)	7 bis 10 Monate
Gaskessel	Nie *
Ölkessel	Nie *

Die energetische Amortisationszeit beschreibt die Zeit, die die Anlage braucht, um die Energie für Herstellung, Betrieb und Entsorgung wieder herein zu holen. (* Kraftwerke und Kessel auf Basis erschöpflicher Energieträger amortisieren sich energetisch nie, da sie immer mehr Brennstoffe verbrauchen, als sie Nutzenergie erzeugen.)



CO_2-Vermeidungskosten durch die Strom- und Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien. Bezug: Mix neuer fossiler Kondensationskraftwerke bzw. Wärmeversorgung von Einfamilienhäusern mit einem Mix aus Gas-Brennwertkessel und Öl-Niedertemperaturkessel.

Durch Kostendegression, technische Fortschritte und steigende fossile Energieträgerpreise werden die CO_2-Vermeidungskosten erneuerbarer Energien künftig erheblich abnehmen. Bei fossilen Kraftwerken ist es genau umgekehrt.

rungskosten von 140 Euro/t CO_2. Mit anderen Worten: Ein Kohlekraftwerk kommt über ein gewisses Maß an CO_2-Minderung prinzipiell nicht hinaus. Im Gegensatz dazu gehen die CO_2-Vermeidungskosten für Wind wegen der erwarteten Kostendegression kontinuierlich zurück und liegen bereits mittelfristig deutlich unter den Minderungskosten der Steinkohle-Technologien.

Andere Umweltwirkungen der erneuerbaren Energien

Neben den – aus energiewirtschaftlicher Sicht besonders wichtigen – Treibhausgas-Emissionen und dem Verbrauch energetischer Ressourcen gibt es weitere Umweltwirkungen: Die Versauerung des Bodens, die Nährstoffanreicherung (Eutrophierung) von Böden und Gewässern, Sommersmog oder der Ausstoß toxischer Stoffe. Hier hängt das Ergebnis der Ökobilanz sehr stark von der spezifischen Technologie, dem verwendeten Energieträger, den Umgebungsfaktoren sowie der geografischen Lage der Anlage ab.

Die **versauernden Emissionen** fast aller erneuerbarer Stromsysteme liegen deutlich unter den durchschnittlichen Emissionen des deutschen Kraftwerksparks. Dies gilt auch für erneuerbare Wärmesysteme – bis auf Stroh, das auf Grund seines Chlor- und Schwefelgehaltes und der Stickoxide höhere Emissionen hat als ein typischer Öl- oder Gaskessel. Eine weitere Ausnahme bildet die Erzeugung von Strom und Wärme aus Biogas: der bei der Biogaserzeugung entstehende Gärrest bringt prozessbedingt Ammoniakemissionen aus dessen Lagerung und Ausbringung auf Felder mit sich. Allerdings können diese Emissionen gering gehalten werden, wenn Lager abgedeckt werden und der Gärrest direkt nach Ausbringung in den Boden eingearbeitet wird.

Bei der **Eutrophierung** und dem Beitrag zum Sommersmog liegen die meisten der erneuerbaren Energieanlagen besser als die fossilen Konkurrenten – mit Ausnahme einiger der Biomasse-Systeme. Dies liegt unter anderem daran, dass Biomasse-Kraftwerke häufig kleiner sind als Gas- oder Kohlekraftwerke und deshalb weniger Aufwand zur Reduktion der Stickoxid-Emissionen betrieben werden kann. Bei der ausschließlich für die Energiegewinnung angebauten Biomasse kommen die Aufwendungen für die landwirtschaftlichen Maschinen, die Düngemittelproduktion und die Emissionen aus den Ackerböden hinzu.

Gerade bei den kleinen Biomasse-Feuerungen, die in den letzten Jahren einen deutlichen Ausbau erfahren, sind außerdem die **Feinstaub-Emissionen** höher als bei Gas- und Ölheizungen. Pelletheizungen weisen dabei deutlich niedrigere Emissionen auf als Hackschnitzel- oder Scheitholzanlagen. Die Hersteller von Biomasse-

Feuerungen sind dabei, kostengünstige Staubfilter und eine verbesserte Feuerungstechnik zu entwickeln, so dass diese Staubemissionen künftig deutlich niedriger ausfallen können. Gerade bei den sehr kleinen, manuell bedienten Feuerungen wie Kaminöfen ist eine sachgerechte Bedienung wichtig für niedrige Feinstaubemissionen.

Bei auf **Energieplantagen** angebauten Bioenergieträgern können sich weitere Umweltwirkungen ergeben: Ein Nährstoffeintrag in Grund- und Oberflächengewässer, eine Belastung durch Pestizide und ein Rückgang der Tier- und Pflanzenvielfalt (siehe Kapitel "Biokraftstoffe"). Bezüglich der Bodenerosion weisen mehrjährige Pflanzen aufgrund der ganzjährigen Bodenbedeckung ein deutlich geringeres Austrags- und Auswaschpotenzial auf als einjährige Pflanzen. Mehrjährige Kulturen weisen auch deutlich geringere pestizidbedingte Umweltschäden auf, denn hier werden deutlich weniger Pestizide eingesetzt als bei den einjährigen Kulturen wie Raps und Zuckerrübe. Das Risiko einer Belastung durch Pestizide kann in der Praxis sogar dann ausgeschlossen werden, wenn die Energiepflanzen nach Ökolandbaurichtlinie produziert werden.

Erneuerbare Energien und Naturschutz

Durch die klimaschützende Wirkung der erneuerbaren Energien haben diese zunächst sehr positive Wirkungen auf den Naturschutz. Da der Klimawandel massive negative Auswirkungen auf die Artenvielfalt hat – z. B. ein drastischer Rückgang der Arten – sind klimaschützende Maßnahmen grundsätzlich positiv zu sehen. Sie dürfen aber keine anderen, unangemessenen negativen Auswirkungen auf Natur und Umwelt haben. Darauf ist beim weiteren Ausbau der EE streng zu achten.

Nur wenn die erneuerbaren Energien auch die Belange des Naturschutzes berücksichtigen, finden sie eine breite Akzeptanz. Der ökologisch optimierte Ausbau der erneuerbaren Energien muss darum auch den **Erhalt der biologischen Vielfalt, des Naturhaushaltes und des Landschaftsbildes sowie den naturverträglichen Hochwasserschutz** sicherstellen.

Um mögliche negative Effekte auszuschließen oder zu minimieren, müssen die Auswirkungen auf Naturhaushalt und Landschaftsbild für Erzeugung und Nutzung von erneuerbaren Energien ermittelt werden. Dazu gehört auch die Erprobung und Entwicklung langfristig wirksamer Vorkehrungen zur Vermeidung und Verminderung negativer Auswirkungen sowie geeigneter Ausgleichsmaßnahmen.

Windanlagen werden naturgemäß an besonders windreichen und damit exponierten Standorten aufgestellt. Dadurch beeinträchtigen sie das Landschaftsbild und kollidieren häufig mit Vogelflugrouten. Die Anlagenplanung muss diese und andere naturschutzfachlichen Belange berücksichtigen. Die sachgemäße Standortwahl ist daher ein aus Naturschutzsicht wesentlicher Schritt. Bei den Auswirkungen von Windenergieanlagen auf die Fauna und Avifauna (Vögel) geht es dabei um die Beeinträchtigung von Lebensräumen bis hin zum Verlust von Rast-, Brut- und Nahrungshabitaten, um Störungen und Scheuchwirkungen und schließlich auch um direkten Verlust durch Vogelschlag. Dies gilt sowohl für Windkraftanlagen an Land und auf See.

Die potenzielle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes, speziell in den stark strukturierten Mittelgebirgsregionen, kann von den Planern dargestellt und bewertet werden. Anlagenzahl, Standort, Anpassung der Aufstellordnung an die landschaftlichen Gegebenheiten, Fernwirkung und die Beziehung zu Sichtachsen spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Wichtig ist, dass die auf kommunaler Ebene vorhandenen Steuerungsinstrumente genutzt werden. So werden im konkreten Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen Naturschutzbelange geprüft, bewertet und auch Auflagen formuliert, um Störungen der Vogelwelt bei Zug und Rast möglichst gering zu halten oder auszuschließen. Gleiches gilt auch für Fragen des Landschaftsschutzes.

Wasserkraftanlagen erzeugen gegenüber fossilen Energieträgern nahezu emissionsfrei Energie, verursachen jedoch lokal bis überregional wirkende Effekte, die sich auf das ökologische Gleichgewicht des Gewässers, abhängige Landökosysteme und Feuchtgebiete negativ auswirken können. Da nur noch 21 % der kartierten Gewässerstrecken in Deutschland als "mäßig verändert" bis "unverändert" eingestuft werden, besteht zwischen Wasserkraftnutzung, Naturschutz und Gewässerschutz ein nicht unbeträchtliches Spannungsfeld. Bei Laufwasserkraftwerken kann die Fischwanderung durch die Unterbrechung des Gewässerflusses erschwert werden. Der Bau von Wehren und Ausleitungskanälen, Aufstauungen und Verringerung der Fließgeschwindigkeit, Turbulenz und Schleppkraft des Gewässers verändern die Gewässerstruktur, den Transport von Sedimenten und den ökologischen Haushalt des Gewässers und seiner Umgebung.

Die Konflikte zwischen Klima-, Natur- und Gewässerschutz können durch gewässerbauliche Maßnahmen vermindert werden. Fischauf- und -abstiegshilfen, Umgehungsgerinnen und Lockströmungen verbessern die Durchgängigkeit der Flüsse. Ziel beim weiteren Ausbau der Wasserkraft ist eine Leistungssteigerung der Anlagen bei gleichzeitiger Verbesserung der gewässerökologischen Situation. Die Potenziale liegen also im Ersatz und der Modernisierung vorhandener Anlagen.

Auch bei der Errichtung und dem Betrieb von **Solarenergieanlagen** sind die Naturschutzbelange zu berücksichtigen, sofern es sich um Freilandanlagen handelt. Einer der wichtigsten Ansätze zur Vermeidung von Kon-

flikten ist die Auswahl des "richtigen" Standorts. Der Aufwand für weitere Ausgleichsmaßnahmen wird dadurch deutlich reduziert.

Der ganz überwiegende Teil der **Photovoltaik** ist auf Gebäuden installiert. Von diesen Anlagen gehen keine negativen Umweltauswirkungen aus und es ist gerade dieser Aspekt, der zur Faszination und hohen Akzeptanz der Photovoltaik führt. Dagegen können auf Wiesen, Feldern und Brachen installierte Anlagen durchaus die Umwelt beeinträchtigen, weil sie Böden verdichten und versiegeln, Lebensräume zerschneiden und Vegetations- und Biotopstrukturen zerstören. Allerdings sind diese Eingriffe gering – maximal 4 % der Fläche einer Freilandanlage werden mit Fundamenten versiegelt – oder sie lassen sich durch technische Maßnahmen minimieren. So kann man auf Zäune ganz verzichten oder sie zumindest so planen, dass sie durchlässig für Kleinlebewesen sind. Weiterhin können bevorzugt Flächen belegt werden, die aufgrund einer Vornutzung (Deponien, Brachen, Ackerland) bereits eine geringe ökologische Qualität aufweisen. Entsprechend gewährt das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) eine Vergütung an Freiflächenanlagen auch nur dann, wenn eine Vornutzung vorliegt.

Innerhalb der erneuerbaren Energien kommt der **Biomasse** eine besondere Bedeutung zu. Während bei der Stromerzeugung Wind- und Wasserkraft eindeutig dominieren, wird regenerative Wärme derzeit zu über 90 % aus Biomasse bereitgestellt. Zudem ist Biomasse in absehbarer Zeit die einzige regenerative Quelle für biogene Kraftstoffe. In der Vergangenheit wurden organische Rest- und Abfallstoffe aus der Landwirtschaft (Stroh, Rübenblatt, Gülle, Jauche und Mist), der Grünland-, Landschafts- und Waldpflege (Mähgut, Heckenschnitt und Waldrestholz) sowie der Industrie (Altholz) schon in begrenztem Umfang zur Strom- und/oder Wärmeproduktion eingesetzt. Darüber hinaus wurden aber auch nachwachsende Rohstoffe auf so genannten Stilllegungsflächen angebaut, die nicht für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion benötigt wurden. Diese landwirtschaftlichen Produkte wurden entweder stofflich (nachwachsende Rohstoffe für die chemische oder pharmazeutische Industrie) oder energetisch (Bioenergie zur Strom- und Wärmeproduktion sowie Biokraftstoffe im Verkehrssektor) genutzt.

Begünstigt durch die ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ist die Nachfrage nach Bioenergieträgern in den letzten Jahren rapide angestiegen und hat zu einer starken Zunahme des Energiepflanzenanbaus geführt.

Bei der Strom- und Wärmeproduktion kam es insbesondere durch das EEG zu einem Biogasanlagen-Boom. Die neu gebauten Anlagen werden vor allem mit Mais, Getreideganzpflanzen und Gras betrieben, die nur für den Einsatz in Biogasanlagen angebaut werden. Auch die Ganzpflanzennutzung von Stauden oder mehrjährigen Gehölzen in Feuerungsanlagen scheint langsam Fuß zu fassen. Da die Rest- und Abfallstoffe – selbst wenn ihr Potenzial vollständig erschlossen würde – den Bedarf in Deutschland nicht decken können, ist auch für die Bioenergieproduktion mit einer weiteren Ausweitung der Anbauflächen zu rechnen.

Unter Naturschutzaspekten stellen sich zwei Fragen: Wie ist dieser boomende Non-Food-Biomasseanbau aus Naturschutzsicht zu bewerten, und wie ist der notwendige Flächenbedarf in Konkurrenz zu anderen Zielen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, die ebenfalls Fläche benötigen, zu sehen?

Die starke **Zunahme des Energiepflanzenanbaus** der letzten Jahre hatte zwar positive Folgen für das Klima, aber auch negative Auswirkungen auf Natur und Landschaft, weil die Fruchtfolgen verengt und Grünland umgebrochen wurden. Wie eine intensive landwirtschaftliche Bodennutzung generell kann auch der Anbau von Energiepflanzen zu problematischen Belastungen von Natur und Umwelt führen. Dazu gehört die Verringerung der Biodiversität in der Landwirtschaft durch die Konzentration auf wenige Kulturarten, das Risiko einer verstärkten Erosion oder eines erhöhten Stickstoffeintrags. Um solche Konflikte zwischen Energiepflanzenanbau und Naturschutz zu mindern bzw. zu vermeiden, gibt es eine Reihe an möglichen Handlungsfeldern (siehe Kasten). Daneben bedingt eine erhöhte Nachfrage nach Energiepflanzen auch eine zunehmende Flächennutzungskonkurrenz. Sie kann dazu führen, dass ehemals extensiv oder nicht genutzte Flächen – wie etwa Flächen aus dem Vertragsnaturschutz, Säume oder Brachen – in intensive Nutzung genommen werden und ihre wichtigen ökologischen Funktionen verlieren. Dies ist insofern nicht unerheblich, da von einigen dieser Flächen eine besondere Naturschutzrelevanz für den Aufbau des Netzes "Natura 2000" ausgehen kann. Darüber hinaus sind viele dieser Flächen für den in der "Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt" angestrebten Biotopverbund von erheblicher Bedeutung.

Um den zunehmenden Flächendruck durch Energiepflanzenanbau zu mindern, ist mittelfristig eine verstärkte räumliche Steuerung des Energiepflanzenanbaus sinnvoll. Dies würde nicht nur den Druck auf ökologisch relevante Flächen minimieren, sondern könnte auch der öffentlichen Sorge um Nutzungskonkurrenzen zwischen Energiepflanzen und Nahrungsmitteln begegnen.

Auch andere Nachhaltigkeitsziele beanspruchen Fläche. In der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung ist beispielsweise aufgeführt, dass der Anteil des ökologischen Landbaus an der landwirtschaftlich genutzten Fläche bis 2010 auf 20 % steigen soll. Darüber hinaus fordert das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG 2002, § 3) die Schaffung eines länderübergreifenden Biotopverbundes, welcher der Arten- und Lebensraumerhaltung dienen und 10 % der Landesfläche umfassen soll. Aus Gründen des Boden- und Gewässerschutzes ist zudem

Infobox: Vermeidung und Minderung von Konflikten zwischen Energiepflanzenanbau und Naturschutz

Quelle: PG Biogas, IFEU et al. 2008

1. Verengung der Fruchtfolgen und Konzentration auf einige wenige Kulturen vermeiden
Bei überwiegendem Einsatz nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung sollte eine Mindestanzahl an einzusetzenden Kulturarten festgelegt werden, von der keine mehr als 50 % Massenanteil einnehmen sollte. So wird indirekt eine größere Anbauvielfalt im Einzugsgebiet der Anlage erzeugt.

2. Standortangepasste Anbaukulturen und -verfahren nutzen
Insbesondere erosionsgefährdete (z. B. Hanglagen), gegenüber Stickstoffdüngung sensible oder tendenziell humusunterversorgte Standorte gilt es zu schützen. Auf Hanglagen sollte daher auf Maisanbau verzichtet werden bzw. grundsätzlich auf besonders erosionsmindernde Anbauverfahren zurückgegriffen werden. Die Begrenzung der Stickstoffgaben und die Nachweispflicht einer ausgeglichenen Humusbilanz sind weitere Merkmale eines standortangepassten Energiepflanzenanbaus.

3. Ökologisch wertvolle Brachen oder Grenzertragsflächen für den Naturschutz erhalten
Nicht oder nur extensiv genutzte Flächen haben in der Agrarlandschaft eine besondere ökologische Bedeutung. Daher sollte ein Anteil von Flächen mit ökologischen Ausgleichsfunktionen in einer Größenordnung von 10 % erhalten werden. Diese Flächen sollten extensiv bewirtschaftet werden, wenn es für die Aufrechterhaltung der ökologischen Funktionen erforderlich ist.

4. Grünlandbestand erhalten
Die Umwandlung von Grünland zu Acker ist in den meisten Fällen mit gravierenden nachteiligen Auswirkungen auf den Naturhaushalt verbunden. Auch wirkt sich der Umbruch nachteilig auf den Klimaschutz aus. Die derzeitigen rechtlichen Instrumente zum Erhalt von Grünland sind nicht ausreichend und sollten angesichts des zunehmenden Flächendrucks verschärft werden. Daneben sollten Biogasanlagen, die auf ehemaligem Dauergrünland angebaute Energiepflanzen einsetzen, aus der Vergütung ausgeschlossen werden.

5. Extensive Grünlandnutzung fördern
Auch extensiv erzeugter Grasschnitt kann zur Biogaserzeugung genutzt werden. Durch die extensive Nutzung können Lebensraumqualität und Artenvielfalt erhalten werden ebenso wie die Vielfalt und Eigenart des Landschaftsbildes.

6. Stilllegungsflächen für den Naturschutz erhalten
Die ursprünglich aus konjunkturellen Gründen aus der Nutzung genommenen Ackerflächen haben heute auch eine hohe naturschutzfachliche Bedeutung. Insofern ist der Erhalt eines Mindestanteils dieser Flächen als Rotations- oder Dauerbrachen erwünscht. Werden Energiepflanzen auf diesen Flächen angebaut, sollte die Stilllegungsprämie entfallen oder der Anbau zum Erhalt der ökologischen Funktion an Mindestanforderungen geknüpft sein.

7. Bei vorgezogenen Ernteterminen keine vollständige Aberntung
In Gebieten mit besonderem Vorkommen von Bodenbrütern (z. B. Feldlerchen) können vorgezogene Erntetermine, z. B. in Verbindung mit Zweikulturnutzung den Bruterfolg gravierend stören. In diesen Gebieten sollte entweder auf vorgezogene Erntetermine verzichtet werden oder es sollten Streifen oder Inseln als Rückzugsräume auf der Ackerfläche eingerichtet werden, die nicht eingesät und beerntet werden.

8. Auf standortangepassten Anbau von wasserzehrenden Kulturen achten
Auf Standorten mit beschränktem Wasserdargebot wirkt sich der Anbau wasserzehrender Kulturen besonders nachteilig auf den Wasserhaushalt aus. Das hat sowohl nachteilige Auswirkungen auf die nachhaltige Nutzbarkeit des Standortes als auch auf angrenzende Lebensräume. Auf diesen Flächen sollte der Anbau dieser Kulturen z. B. durch Nutzungsbestimmungen in Schutzgebietsverordnungen begrenzt werden.

→ Synergien zwischen Naturschutz und Bioenergie

Die verschiedenen Naturschutzmaßnahmen können nicht nur zu Restriktionen in der Biomassenutzung führen; es können sich auch eine Reihe von Synergieeffekten ergeben. Beispielsweise entstehen zusätzliche Biomassepotenziale, wenn Biotope verbunden werden, bei Kompensationsmaßnahmen und bei der Pflege von Offenland und Waldsäumen. Diese Potenziale belaufen sich auf etwa 150 PJ pro Jahr; das ist viel – soviel, wie die gesamten Biogaspotenziale ausmachen. Insofern gilt es zukünftig, besonders die Potenziale zu realisieren, bei denen Klimaschutz und Naturschutz Hand in Hand gehen.

Zudem entwickeln sich neue, innovative Anbausysteme wie der **Mischfruchtanbau**, bei dem verschiedene Energiepflanzen wie Mais und Sonnenblumen gleichzeitig angebaut werden. Bei **Zweikulturensystemen** werden unterschiedliche Winter- und Sommerkulturen kombiniert und die Pflanzen der ersten Ernte noch vor der Ausreife vom Feld geholt. Dadurch können die Felder zweimal im Jahr abgeerntet werden. Gleichzeitig wird das Feld ganzjährig gegen Erosion geschützt und der Einsatz von Pestiziden und Herbiziden entfällt, weil Wildpflanzen mitgeerntet werden und ein eventueller Pilzbefall den Ertrag kaum mindert. Bei Zweikultursystemen besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Auswirkungen auf die Fauna. Beispielsweise kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die frühen Schnitt- und Bearbeitungszeitpunkte insbesondere auf im Acker brütende Vogelarten negativ auswirken (Verlust der Gelege und Jungvögel).

der Anbau von mehrjährigen Kulturen auf stark erosionsgefährdeten Flächen einem Anbau von einjährigen Kulturen vorzuziehen. Damit ergibt sich zwar eine Reduktion von “frei zur Verfügung stehenden Flächen”, andererseits aber können die mehrjährigen Pflanzen als Energiepflanzen genutzt werden.

Durch geeignete Standortwahl, die auf die standörtlichen Empfindlichkeiten Rücksicht nimmt, durch den Verzicht auf Grünlandumbruch oder Nutzungsintensivierungen und durch einen sinnvollen Mix an erneuerbaren Energien können Auswirkungen auf Natur und Landschaft minimiert und Synergien gefunden werden.

Der zusätzliche Flächenbedarf dieser Nachhaltigkeitsziele gegenüber heute beträgt bei vollständiger Umsetzung bis 2010 über 2 Mio. Hektar. Das ist in etwa so viel, wie an landwirtschaftlicher Fläche übrigbleibt, wenn man als weiteres Nachhaltigkeitsziel anstrebt, dass 100 % der in Deutschland verbrauchten Nahrungs- und Futtermittel auch hier produziert werden. Damit wird deutlich, dass Fläche in Deutschland mittlerweile nicht nur ein knappes Gut darstellt, sondern dass eine Konkurrenz um die verbleibenden Flächen droht, wie dies bereits heute beim Ausweisen von Flächen für den Biotopverbund, für die Vogelschutzrichtlinie oder die “Natura 2000”-Flächen der Fall ist. Auf der anderen Seite werden Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft sowie (langfristig) der Rückgang der Bevölkerung weitere Flächen freisetzen. Auch ließen sich mehr Energiepflanzen anbauen, wenn man einen deutlich geringeren Selbstversorgungsgrad mit Nahrungsmitteln als Ziel zulässt.

Die aufgezeigten potenziellen Konflikte zwischen Naturschutz und Klimaschutz sind nicht unlösbar – im Gegenteil: Durch geeignete Standortwahl und einen sinnvollen Mix an erneuerbaren Energien können Auswirkungen auf Natur und Landschaft minimiert und Synergien gefunden werden. Auf diese Weise lässt sich sowohl dem Ziel des nachhaltigen Ausbaus der erneuerbaren Energien als auch der Erhaltung der biologischen Vielfalt Rechnung tragen.

Was für erneuerbare Energien selbstverständlicher Maßstab für ihre umweltverträgliche Nutzung ist, muss natürlich auch für die fossil-nuklearen Energiearten gelten. Sonst besteht die Gefahr einer einseitigen Betrachtung und Bewertung. Sie kann schnell dazu führen, selbst geringe lokale Wirkungen der Nutzung erneuerbarer Energien als bedenklich einzustufen und die wesentlich schwerwiegenderen Auswirkungen der Nutzung fossiler und nuklearer Energien für unseren gesamten Lebensraum aus den Augen zu verlieren.

Infos: Bundesamt für Naturschutz (www.bfn.de)

STAND UND PERSPEKTIVEN ERNEUERBARER ENERGIEN

Heutige Energienutzung in Deutschland

Sechs Tonnen Steinkohle oder rund 47.000 Kilowattstunden – so viel Energie verbrauchte 2008 im Schnitt jeder Deutsche: pro Bürger ein LKW voll Kohle. Technisch ausgedrückt sind dies insgesamt 14.003 Petajoule (PJ) Energierohstoffe. Von den 14.003 PJ, die in Kraftwerken als Rohstoffe eingesetzt werden, kommen wegen Verbrauch und Verlusten im Energiesektor nur zwei Drittel beim Verbraucher an – dies ist die sogenannte Endenergie. Bei der Stromerzeugung kommt auf Grund der Verluste der Kraftwerke sogar nur ein Drittel der Primärenergie beim Endkunden an. Knapp ein Drittel dieser Endenergie nutzen wir für die Beheizung von Wohnungen, zum Kochen, für Beleuchtung und andere private Stromanwendungen. Ein weiteres Drittel geht in den Verkehrssektor, der Rest wird von Industrie und Gewerbe für die Bereitstellung von Waren und Dienstleistungen eingesetzt.

Im Jahr 2007 ist der Primärenergieverbrauch im Vergleich zu 2006 deutlich zurückgegangen, 2008 aber wieder leicht angestiegen. Dennoch liegt der Verbrauch von 2008 wesentlich unter dem des Jahres 2006. Die Gründe sind vielfältig. Einen Teil hat dazu der warme Winter beigetragen. Betrachtet man einen längeren Zeitraum, erkennt man aber auch eine steigende Effizienz in der Industrie und den privaten Haushalten, die mit immer effizienterer Technik, mit dem industriellen Strukturwandel und der Tendenz zu mehr Dienstleistungen zusammen hängt. Heute benötigt die Wirtschaft für eine vergleichbare Leistung nur noch die Hälfte der Energie wie vor 50 Jahren. Dass der Energieverbrauch seitdem trotzdem gestiegen ist, liegt daran, dass wir gegenüber den 50er Jahren ein Vielfaches konsumieren.

Der Beitrag erneuerbarer Energien zur Versorgung Deutschlands ist in den vergangenen zehn Jahren von 3,1 auf 10 % gestiegen.

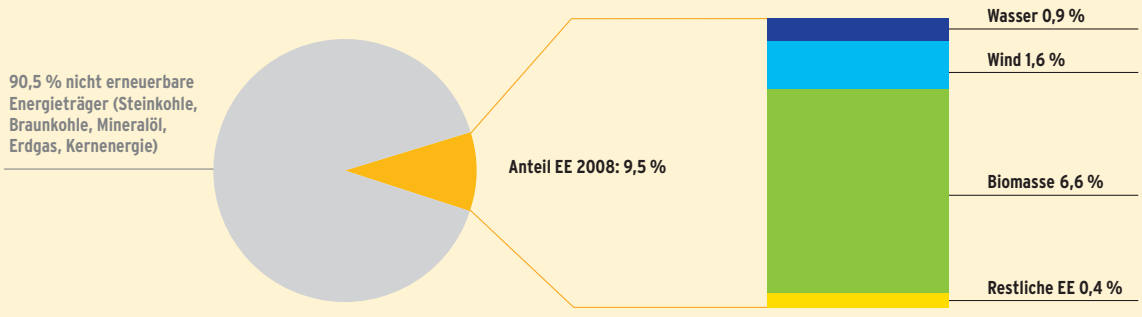
Kühlschränke, Fernseher, Waschmaschinen, Fernreisen – was damals nur einer begrenzten Gruppe zur Verfügung stand, nehmen heute fast alle Deutschen in Anspruch. Und es wird immer mehr.

Die Entkopplung von Wirtschaftsleistung und Energieverbrauch ist darum eine zentrale Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung. Anders als in den ersten Jahrzehnten der Bundesrepublik muss auch bei steigender Wirtschaftsleistung der Energieverbrauch sinken, während sich parallel der Energiemix wandelt. Unsere Energieversorgung stützt sich nach wie vor zum größten Teil auf fossile Energieträger. Der Wärmemarkt ist geprägt durch Gas und Heizöl, im Verkehrsbereich kommen nahezu ausschließlich Mineralölprodukte zum Einsatz. Elektrizität wird überwiegend aus Braun- und Steinkohle erzeugt und mit steigender Tendenz aus Erdgas. Der Anteil der nuklearen Stromerzeugung betrug 2007 etwa 22 %. Dieser Anteil wird durch den Beschluss zum Atomausstieg bis Anfang der 20er Jahre auf null zurückgehen.

Erneuerbare Energien sind eine Alternative zu fossilen und nuklearen Energieträgern. Biomasse, Wasserkraft, Windenergie, Geothermie und die thermische sowie elektrische Nutzung von Sonnenenergie deckten im Jahr

→ **Endenergieverbrauch 2008**

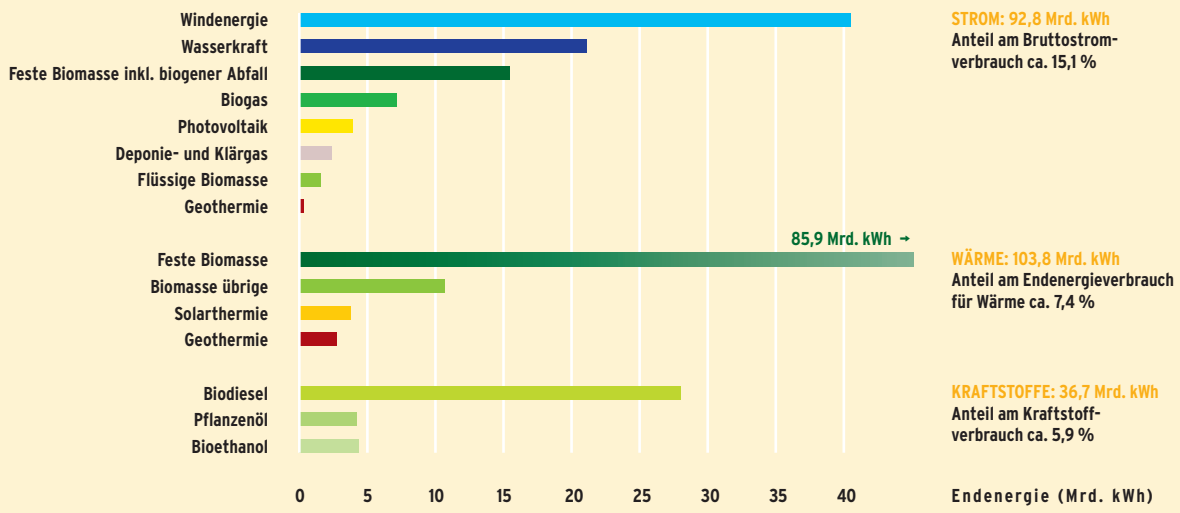
Quelle: AGEE-Stat 2009; AG Energiebilanzen (vorläufige Angaben)


90,5 % nicht erneuerbare Energieträger (Steinkohle, Braunkohle, Mineralöl, Erdgas, Kernenergie)
Anteil EE 2008: 9,5 %
Wasser 0,9 %
Wind 1,6 %
Biomasse 6,6 %
Restliche EE 0,4 %

Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2008 (8.828 PJ). Zahlenabweichungen durch Rundung.

→ Beiträge zur Energieversorgung

Quelle: AGEE-Stat (vorläufige Angaben)



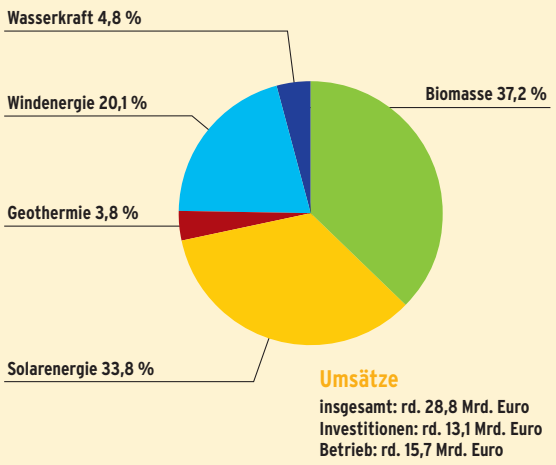
Beiträge erneuerbarer Energien zur Strom-, Wärme- und Kraftstoffversorgung 2008. Anteil am gesamten Endenergieverbrauch 9,5 %.

2008 rund 9,5 % des Endenergiebedarfs. Auf den ersten Blick scheint dies wenig zu sein, bemerkenswert sind jedoch die hohen Wachstumsraten: noch vor zehn Jahren lag der Anteil bei 3,1 %.

Im Wärmemarkt legen die erneuerbaren Energien ebenfalls zu: Der starke Preisanstieg für Heizöl und Erdgas hat zu einer Renaissance des Holzes beigetragen. Heute werden moderne, effiziente und umweltfreundliche Holzzentralheizungen angeboten, die meist Pellets – kleine Presslinge aus Holz- und Hackschnitzel – einsetzen (siehe Kapitel "Biomasse als Brennstoff"). Weil sie sich sehr gut regeln und automatisch mit Brennstoff beschicken lassen, bieten sie den Komfort, den Nutzer erwarten und von Öl- oder Gasheizungen gewohnt sind. Die Erschließung von Geothermie und Sonnenenergie wird immer populärer. Inzwischen sind in Deutschland über elf Millionen Quadratmeter Kollektorfläche installiert, um Energie für die Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung bereitzustellen. Auch im Verkehrsbereich stieg der Anteil erneuerbarer Energien am Kraftstoffverbrauch rapide: von 0,4 % im Jahr 2000 auf 5,9 % 2008.

→ Umsatz mit erneuerbaren Energien

Quelle: BMU nach ZSW



Umsatz mit erneuerbaren Energien in Deutschland 2008

Erneuerbare Energien als Wirtschaftsfaktor

Erneuerbare Energien haben sich zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor mit attraktiven Zuwachsraten entwickelt. Im Jahr 2008 wurden allein in Deutschland knapp 29 Mrd. Euro mit erneuerbaren Energien erwirtschaftet. Das ist fast dreimal so viel wie 2003. Die Investitionen in neue Anlagen beliefen sich 2008 auf über 13 Milliarden Euro. Aufgrund der hohen Ausbaudynamik entfiel davon fast die Hälfte auf den Bau von Photovoltaikanlagen zur solaren Stromerzeugung. Den zweiten großen Bereich stellt die energetische Nutzung von Biomasse dar. Aufgrund der drastisch gestiegenen Preise für fossile Energieträger hat sich der Markt für thermische Systeme sehr positiv entwickelt. Im Bereich der Windenergie wurde gegenüber dem Vorjahr ein leichter Rückgang der Investitionen verzeichnet. Stattdessen profitieren die Unternehmen zunehmend vom Export. Darüber hinaus werden Erlöse aus dem Anlagenbetrieb erwirtschaftet, insgesamt rund 16 Milliarden Euro (2008).

Erneuerbare Energien schaffen Beschäftigung. 2008 waren es in Deutschland rund 280.000 Stellen, mit steigender Tendenz. Nach wissenschaftlichen Untersuchungen kann die Zahl bis 2020 auf 400.000 anwachsen. Erneuerbare Energien haben einen wichtigen struktur-

2008 arbeiteten in Deutschland schon fast 280.000 Menschen in der Branche der erneuerbaren Energien. Tendenz weiter steigend.

Was für den "Exportweltmeister" Deutschland generell gilt, gilt auch hier: Bei den erneuerbaren Energien verfügen wir über Spitzentechnologien.

politischen Nebeneffekt. Arbeitsplätze entstehen oft dort, wo sie besonders gebraucht werden: Die Windenergie wächst besonders in den Küstenregionen, in denen Werften im Bau von Windkraftanlagen ein neues Arbeitsfeld gefunden haben. In Ostdeutschland und der ehemaligen Kohleregion in Nordrhein-Westfalen haben sich ebenfalls neue Unternehmen der erneuerbaren Energien angesiedelt und treiben den Strukturwandel voran. Allein in den vergangenen zwei Jahren sind mindestens 15 neue Solarfabriken in Betrieb gegangen oder noch im Bau – mit einem Investitionsvolumen von jeweils rund einer Milliarde Euro. Drei Viertel der deutschen Führungskräfte, von einer großen Wirtschaftszeitung nach der Branche mit dem größten Zukunftspotenzial befragt, nennen die alternativen Energien an erster Stelle.

Weil erneuerbare Energien heimische Energieträger sind, verbleibt ein Großteil der Wertschöpfung vor Ort. Insbesondere mit der Nutzung von Biomasse schaffen wir neue lokale Wirtschaftskreisläufe und damit Arbeitsplätze im Land. Dies gilt ebenso für die Bauwirtschaft und das Handwerk. Schrittweise fließen so die finanziellen Mittel, die bislang Öl, Gas und Kohle exportierenden Ländern zugute kamen, in nationale Wertschöpfung.

Allerdings ist die Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien heute noch meist teurer als herkömmliche Energie. Solange die Wettbewerbsfähigkeit noch nicht erreicht ist (siehe S. 18), müssen diese sogenannten Differenzkosten also von den Energieverbrauchern getragen werden. Dies hat auch zur Folge, dass diesen Haushalten der entsprechende Betrag nicht zur Verfügung steht, um andere Güter zu konsumieren. Dieser so genannte Budgeteffekt führt zu negativen Beschäftigungswirkungen in anderen Branchen. Angesichts der anhaltend hohen Arbeitslosenzahlen in Deutschland sollten umweltpolitische Maßnahmen deshalb auch den Nettobeschäftigungseffekt im Auge behalten. Neuere wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass unter dem Strich bisher nicht nur der Bruttobeschäftigungseffekt, sondern auch der Nettobeschäftigungseffekt der Nutzung erneuerbarer Energien positiv ist. Dies liegt maßgeblich am Außenhandel im Bereich der erneuerbaren Energien, der die Beschäftigungsbilanz bereits jetzt positiv beeinflusst und weiter zunehmen soll. Viele Unternehmen exportieren deutlich mehr als sie aus dem Ausland beziehen. So stieg die Exportquote der deutschen Windanlagenhersteller auf rund 70 % im Jahr 2007.

Wichtig für einen starken Export ist auch ein funktionierender heimischer Markt. In der Vergangenheit hat sich immer wieder gezeigt, dass eine reale Chance für eine gute Positionierung am internationalen Markt nur durch die Existenz eines nationalen Marktes besteht. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Mobilfunktechnologie, die in Japan und Südkorea frühzeitig stark war und deren Unternehmen bis heute den Weltmarkt dominieren. Ähnliches gilt im Hinblick auf die erneuerbaren Energien bislang für Deutschland; diese Stellung gilt es, zu behaupten und möglichst auszubauen.

Die Förderung der erneuerbaren Energien

Der Ausbau erneuerbarer Energien geschieht nicht von selbst. Neben den technischen, rechtlichen und organisatorischen Voraussetzungen müssen auch günstige ökonomische Rahmenbedingungen gegeben sein. Einige erneuerbare Energien werden in einigen Jahren billiger sein als viele herkömmliche Rohstoffe. Aber bis es so weit ist, muss der Staat unterstützende Rahmenbedingungen schaffen. Dann werden durch das so genannte "Lernen am Markt" Kostensenkungspotenziale rasch ausgeschöpft und der Förderbedarf sinkt sukzessive, bis die erneuerbaren Energien in der Breite die Wettbewerbsfähigkeit erreicht haben.

Die Bundesregierung unterstützt die Marktentwicklung erneuerbarer Energien durch verschiedene Maßnahmen. Die wichtigsten Instrumente sind

- im Strommarkt das Erneuerbare-Energien-Gesetz, das feste, vom Netzbetreiber an die Betreiber von erneuerbaren Energieanlagen zu zahlende Tarife für umweltfreundlichen Strom garantiert;
- im Wärmemarkt das Marktanreizprogramm des Bundes sowie das Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz,
- im Kraftstoffmarkt das Biokraftstoffquotengesetz.

Strom

Besonders erfolgreich ist das im Jahr 2000 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), mit dem das 1991 eingeführte Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) mit einem erweiterten Ansatz fortgeschrieben wurde. Durch das EEG hat sich die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien seit 1999 von 30 Mrd. kWh auf über 90 Mrd. kWh im Jahr 2008 verdreifacht. Das EEG ist damit in

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat einen Boom bei der erneuerbaren Stromproduktion ausgelöst.

Deutschland das wichtigste Instrument des Klimaschutzes.

Die staatliche Förderung der erneuerbaren Energien lehnt sich in vielen Ländern der Erde inzwischen an das deutsche EEG an – das damit neben der Wind- und Solartechnik selbst zu einem Exportschlager geworden ist. Drei Komponenten machen das Erfolgsrezept dieses Gesetzes aus:

- der garantierte Anschluss aller erneuerbaren Energieanlagen an das Stromnetz,
- die garantierte Abnahme und Verteilung des in diesen Anlagen erzeugten Stroms und
- feste, in der Regel für zwanzig Jahre festgeschriebene Einspeisevergütungen für die verschiedenen Arten erneuerbarer Energien.

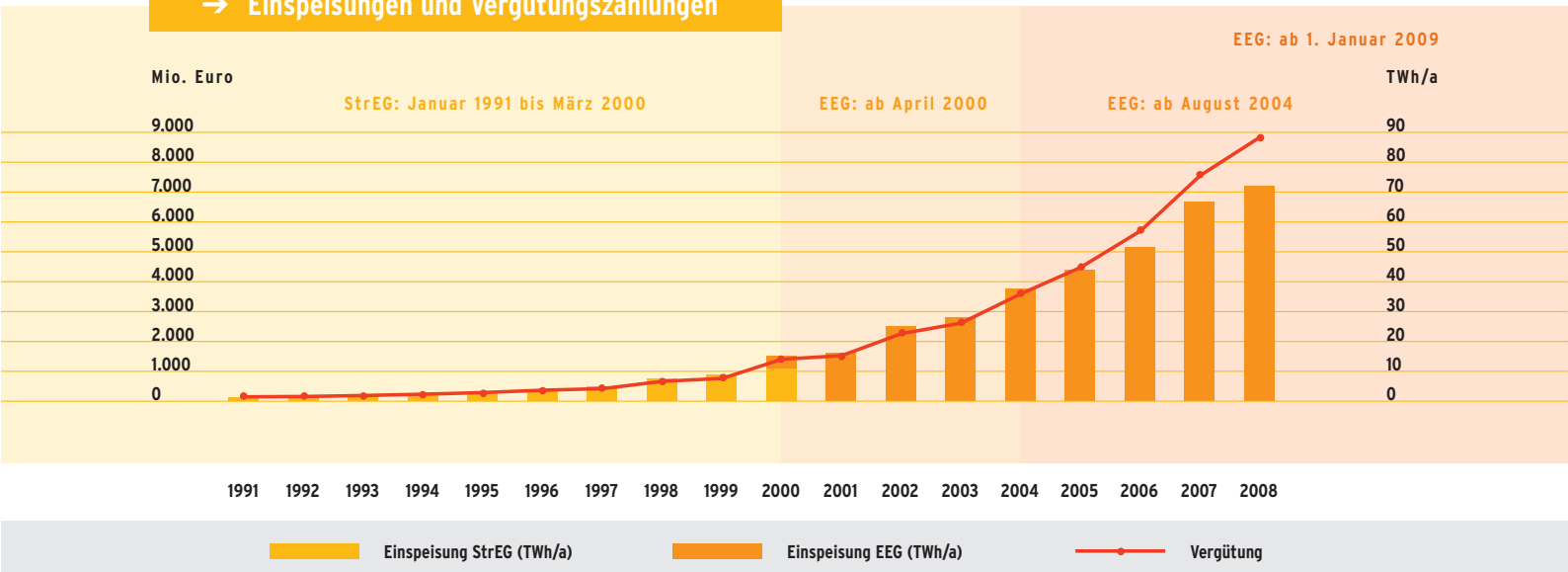
Das EEG verpflichtet die Stromversorger, den zur Zeit noch etwas teureren erneuerbaren Strom in das Portfolio aufzunehmen. Diese Mehrkosten werden auf alle Stromverbraucher umgelegt und erhöhen den Strompreis rechnerisch um gut ein Cent pro Kilowattstunde. Für einen typischen deutschen Haushalt bedeutet dies Mehrkosten in einer Höhe von rund drei Euro pro Monat. Dieser Beitrag verringert nicht nur unsere Importabhängigkeit und Treibhausgas-Emissionen, sondern schützt uns auch vor zukünftigen Preissteigerungen fossiler Energieträger. Strom aus erneuerbaren Energien dämpft die Strompreise an der Börse.

Beim Erneuerbare-Energien-Gesetz erhält der Betreiber für jede Kilowattstunde in das Netz eingespeister Elektrizität vom Netzbetreiber einen festgelegten Betrag. Es gibt auch andere Fördermodelle für erneuerbaren Strom. Bei diesen wird nicht der Preis, sondern die Menge festgelegt, die aus erneuerbaren Energien stammen soll. Bei einem solchen Quotenmodell werden beispielsweise Energieversorger verpflichtet, eine bestimmte Menge erneuerbarer Energien einzusetzen. Diesen Strom produzieren sie entweder selber in entsprechenden Anlagen oder kaufen ihn bei anderen Betreibern von Wind-, Biomasse- oder Solarkraftwerken ein, die ihnen einen günstigen Preis bieten. So entsteht einerseits ein Wettbewerb um den günstigsten Strompreis. Gerade kleine und mittelständische Investoren in erneuerbare Energien können aber oft ihre Einnahmen nur noch schwer abschätzen und der politisch gewollte Ausbau der Erneuerbaren kommt nur langsam voran.

Wenn die Energieversorger die vorgeschriebenen Quoten nicht erreichen, müssen sie oft so genannte Grüner-Strom-Zertifikate von einer Börse für erneuerbaren Strom kaufen oder Strafen für die Unterschreitung der Quoten zahlen. Ein solches gemischtes Quoten- und Zertifikate-Modell wurde in einigen osteuropäischen Ländern installiert. In zahlreichen Studien sowie Berichten z. B. der Europäischen Kommission oder der Internationalen Energieagentur wurde in den letzten Jahren nachgewiesen, dass gut ausgestaltete Stromeinspeiseregelungen wie das EEG gegenüber Quotenregelungen teils deutlich besser abschneiden. Sie führen schneller zu einem stärkeren Ausbau und sind für den Verbraucher günstiger. Rund 50 Staaten weltweit haben daher ein dem EEG vergleichbares Instrument eingeführt.

→ Einspeisungen und Vergütungszahlungen

Quellen: VDEW, VDN, ZSW



Einspeisung und Vergütungszahlungen nach dem Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) und dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

→ Kosten und Nutzen des EEG

Strom aus erneuerbaren Energien ist derzeit aus betriebswirtschaftlicher Sicht – also ohne Betrachtung der eingesparten externen Kosten – teurer als Strom aus nicht erneuerbaren Energiequellen. Wegen der im EEG festgeschriebenen Abnahmepflicht entstehen für die Stromversorger höhere Beschaffungskosten. Sie betrugen 2007 etwa 4,3 Mrd. Euro. Für den durch erneuerbare Energien verursachten zusätzlichen Bedarf an Regel- und Ausgleichsenergie, Transaktionskosten der Übertragungsnetzbetreiber sowie mögliche Mehrkosten durch Teillastbetrieb bei Kraftwerken wurden als Obergrenze weitere 0,3 bis 0,6 Mrd. Euro ermittelt.

Zu den Nutzen des EEG zählt sein positiver Einfluss auf Innovation, Umsatz und Wertschöpfung in Deutschland, verbunden mit der Schaffung neuer Arbeitsplätze. 2008 waren rund 60 % der insgesamt fast 280.000 Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien direkt auf die Wirkung des EEG zurückzuführen.

Im gleichen Kontext sind auch die EEG-bedingten Einsparungen beim Import von Steinkohle und Erdgas zu sehen. Diese beliefen sich 2007 unter Anrechnung der Biomasse-Importe auf etwa 1 Mrd. Euro. Durch die Vermeidung externer Umweltschäden ist dem EEG 2007 außerdem ein gesamtwirtschaftlicher Nutzen von 5,8 Mrd. Euro zuzurechnen (siehe S. 19).

Außerdem fielen durch das zusätzliche Stromangebot aus erneuerbaren Energien die Kosten der Strombeschaffung über den kurzfristigen Spotmarkt 2006 um rund 7,8 Euro/MWh. Dies hat mit der Funktionsweise der Strombörse zu tun: Der zusätzliche Strom stellt der Nachfrage mehr Angebot gegenüber und senkt damit den Preis. Das kommt allen Stromkunden zu Gute. Rechnet man den Effekt auf den gesamten Strommarkt mit seinen langfristigen Liefervereinbarungen hoch, entspräche dies einem Wert von rund 5 Mrd. Euro.

Die verschiedenen Auswirkungen des EEG auf Umwelt, Arbeitsplätze und Strompreise lassen sich nicht in einer Zahl zusammenfassen. Doch es wird sehr deutlich, dass es viel zu kurz greift, die Auswirkungen des EEG etwa auf den einen Cent je Kilowattstunde Mehrkosten zusammenzufassen, die durch das Gesetz den Betrieben und Privatkunden auf der Stromrechnung entstehen.

Die Planungs- und Investitionssicherheit, die durch das EEG geschaffen wird, ist wesentlich für den Erfolg des Gesetzes – gerade beim Mittelstand. Beispiele aus vielen Ländern weltweit zeigen, dass die festen Einspeisevergütungen wesentlich erfolgreicher und in der Regel zu geringeren Kosten die Markteinführung erneuerbarer Energien voranbringen als Mengenregelungen mit Auktionierung oder Zertifikatehandel. Diese Sicherheit ist gerade auch für Banken und Kreditinstitute entscheidend, die über die Vergabe von Krediten für Investitionen in erneuerbare Energieanlagen zu entscheiden haben.

Die Auswirkungen des EEG werden regelmäßig umfassend überprüft, zuletzt Ende 2007. Mit den Daten dieser Erfolgskontrolle wurde im Juni 2008 eine Novelle des Gesetzes vom Deutschen Bundestag verabschiedet. Das EEG bleibt dabei in seiner Grundstruktur erhalten, es wurde aber, wie es der Intention der regelmäßigen Überprüfung entspricht, in einzelnen Bereichen an die veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Dies betrifft einzelne Vergütungssätze, aber auch Regelungen zur besseren Integration des erneuerbar erzeugten Stroms ins Netz. Im Zuge der Novellierung wurden auch die Ausbauziele deutlich erhöht. Anstelle von bislang "mindestens 20 %" soll der Anteil des erneuerbar erzeugten Stroms an der deutschen Stromversorgung bis 2020 jetzt mindestens auf 30 % – und danach kontinuierlich weiter – steigen. Dies entspricht im Jahr einem Anteil von 50 %. Ab dann decken die erneuerbaren Energien also über die Hälfte unseres Strombedarfs.

Wärme

Zum 1.1.2009 ist ein neues Gesetz in Kraft getreten, das "Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz". Es verpflichtet Eigentümer von Neubauten ihren Wärmebedarf anteilig mit erneuerbaren Energien zu decken. Diese Nutzungspflicht gilt für alle Eigentümer: Privatpersonen, Unternehmen oder staatliche Einrichtungen, auch wenn die Immobilie vermietet wird. Mit welchen erneuerbaren Energien diese Pflicht erfüllt wird, ist den Eigentümern überlassen. Wer keine erneuerbaren Energien einsetzen will, kann andere klimaschonende Maßnahmen ergreifen: Eigentümer können ihr Haus stärker dämmen, Wärme aus Fernwärmenetzen beziehen oder Wärme aus der so genannten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) nutzen.

Gleichzeitig werden Heizungen, die erneuerbare Energieträger nutzen, im Marktanreizprogramm zusätzlich gefördert. Altbauten, die nicht der Nutzungspflicht unterliegen, erhalten in der Regel eine höhere Förderung. Das Marktanreizprogramm stellt jedes Jahr rund 400 Millionen Euro zur Verfügung. Es ist damit das größte Programm seiner Art in Europa. Bis heute wurden bereits über 650.000 Solarkollektoranlagen und 132.400 kleine Biomassekessel gefördert. Unterstützt werden Biomasse-Kessel, Sonnenkollektoren, Wärmepumpen, aber auch Nahwärme- und Biogasnetze, Anlagen der tiefen Geothermienutzung, Biogasaufbereitung und innovative Technologien wie große Wärmespeicher und Abgasnachbehandlung bei Biomassekesseln. Seit 2008 werden zusätzliche Anreize für besonders effiziente Anwendungen gegeben.

Was macht die Bundesregierung? Ausgewählte Maßnahmen zur Marktentwicklung erneuerbarer Energien

- Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hat sich – auch im Internationalen Vergleich – als überaus erfolgreiches Instrument zum Ausbau der erneuerbaren Energien im Strommarkt erwiesen. Dadurch werden nicht nur die nationalen Ziele erreicht, sondern auch die Umsetzung der Europäischen Richtlinie zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien aus dem Jahr 2001 umgesetzt. Strom aus erneuerbaren Energien ist nach dem EEG vorrangig abzunehmen und mit fixen Vergütungssätzen über eine feste Laufzeit (in der Regel 20 Jahre) zu vergüten. Dadurch besteht Investitionssicherheit. Die Vergütungszahlungen werden über einen bundesweiten Ausgleichsmechanismus auf alle Stromverbraucher umgelegt. Dabei werden stromintensive Unternehmen entlastet, damit ihnen keine Wettbewerbsnachteile entstehen. Die Degression der Vergütungssätze für künftig in Betrieb gehende Anlagen führt zur Umsetzung von Innovationen und Kostensenkungen. Erneuerbare Energien werden somit zügig in die Wettbewerbsfähigkeit geführt.

- Das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz verpflichtet Eigentümer von neu errichteten Gebäuden, ihren Wärmebedarf zu einem gewissen Anteil aus erneuerbaren Energieträgern zu decken. Ersatzweise kann das Haus auch besonders gut gedämmt, an Wärmenetze angeschlossen oder mit Kraft-Wärme-Kopplung versorgt werden.

- Das Marktanreizprogramm zur Förderung erneuerbarer Energien unterstützt vorrangig die Errichtung von Anlagen zur Erzeugung von Wärme aus erneuerbaren Energien. Mit einem Volumen von etwa 400 Mio. Euro pro Jahr ist es das größte Förderprogramm seiner Art in Europa. Kleinere Anlagen werden durch einen Zuschuss vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (www.bafa.de) gefördert. Größere Anlagen werden durch verschiedene Darlehensprogramme unterstützt, welche die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) abwickelt.

- Im Verkehrssektor sind reine Biokraftstoffe bei der Mineralölsteuer begünstigt. Außerdem gibt es eine Biokraftstoffquote, der zufolge gewisse Mindestanteile an Biokraftstoffen dem konventionellen Benzin und Diesel beigemischt werden müssen. Im Jahr 2009 müssen 5,25 Prozent des Energiegehaltes der Kraftstoffe aus Biokraftstoffen stammen, ab 2010 schon 6,25 Prozent. Ab 2015 wird diese Beimischungspflicht von einer Quote auf einen Nettobeitrag zur Treibhausgas-Verminderung umgestellt. Hierbei werden auch die Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt, die bei der Herstellung der Biokraftstoffe entstehen. Je besser die Treibhausbilanz der Biokraftstoffe, desto stärker werden sie auf die Quote angerechnet.

  Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit und Fachinformation stellt die Bundesregierung zahlreiche Publikationen zu allen Themen der erneuerbaren Energien zur Verfügung. Ein Überblick dazu findet sich auf der Themenseite des Bundesumweltministeriums www.erneuerbare-energien.de.

Verkehr

Beim Kraftstoff hat die Bundesregierung ihre ursprünglich anvisierten Ziele überarbeitet. Grund dafür war die intensive Diskussion über die Nachhaltigkeit des Anbaus von Rohstoffen der Biokraftstoffe (siehe Kapitel “Biokraftstoffe”). Die EU schreibt im Rahmen ihrer neuen erneuerbaren Richtlinie einen verbindlichen Anteil von Biokraftstoffen und anderen erneuerbaren Energieträgern im Verkehr von 10 % für 2020 vor. Außerdem werden europaweit Nachhaltigkeitsstandards für eingesetzte Biokraftstoffe erarbeitet.

Reine Biokraftstoffe sind bei der Mineralölsteuer begünstigt. Außerdem gibt es eine Biokraftstoffquote, der zufolge gewisse Mindestanteile an Biokraftstoffen dem konventionellen Benzin und Diesel beigemischt werden müssen. Im Jahr 2009 müssen 5,25 Prozent des Energiegehaltes der Kraftstoffe aus Biokraftstoffen stammen, ab 2010 6,25 Prozent. Ab 2015 wird diese Beimischungspflicht von einer Quote auf einen Nettobeitrag zur Treibhausgas-Verminderung umgestellt. Diese nach dem “Biokraftstoffquotengesetz” beigemischten Biokraftstoffmengen sind nicht mehr von der Mineralölsteuer befreit. Bestimmte Reinkraftstoffe, beispielsweise reines Bioethanol oder BtL (Biomass-to-Liquid) sind auch weiterhin steuerbefreit, während Biodiesel einem reduzierten, allmählich ansteigenden Steuersatz unterliegt.

Zu bedenken ist, dass die Möglichkeiten zur Einsparung von Kraftstoff im Verkehrsbereich ungleich höher sind als im Stromsektor. Die optimale Strategie besteht darin, die Effizienz hier zusammen mit der Biokraftstoffquote zu steigern.

Innovationsstrategie für erneuerbare Energien

Forschung und Entwicklung sind ein Schlüsselelement für die weitere Erschließung erneuerbarer Energien. Zentrales Ziel des "5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung" aus dem Jahr 2005 ist deshalb, "die Kosten der erneuerbaren Energien weiter zu senken und so die Ausgangsbedingungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien zu verbessern." Dazu müssen Wirkungsgrade und Lebensdauer von Komponenten und Anlagen weiter gesteigert und Produktionsprozesse effizienter und kostengünstiger werden.

Forschungsförderung trägt dazu bei, die Spitzenposition deutscher Unternehmen auf den international rasch wachsenden Märkten zu sichern und damit Arbeitsplätze zu schaffen. Insofern ist die Forschungsstrategie Deutschlands so ausgerichtet, dass auch Technologien entwickelt werden, deren Anwendungspotenzial vorrangig im Ausland liegt. Dazu zählt unter anderem die solarthermische Stromerzeugung.

Bei den Forschungsausgaben für erneuerbare Energien liegt Deutschland weltweit an der Spitze: Im Jahr 2008 hat das Bundesumweltministerium im Bereich der erneuerbaren Energien neue Forschungsprojekte mit einem Gesamtvolumen von 150 Mio. Euro bewilligt. Insgesamt wurden über 160 neue Projekte auf den Weg gebracht. Die Schwerpunkte liegen bei der Photovoltaik (PV) und der Windenergie mit jeweils rund 40 Mio. Euro. Bei der Photovoltaik, weil hier die Vergütungssätze des EEG die höchste Degression aufweisen und entsprechende Kostensenkungen erreicht werden müssen.

Zudem besteht hier das größte Innovationspotenzial. Die hohe Bedeutung der Windenergieforschung ergibt sich daraus, dass vor allem im Offshore-Bereich große technische Herausforderungen zu bewältigen sind. Neben PV und Windenergie hat auch der neu geschaffene Förderschwerpunkt Systemintegration mit knapp 30 Mio. Euro starkes Gewicht. Er zielt auf die Optimierung der Stromversorgung für einen hohen Anteil erneuerbarer Energien ab.

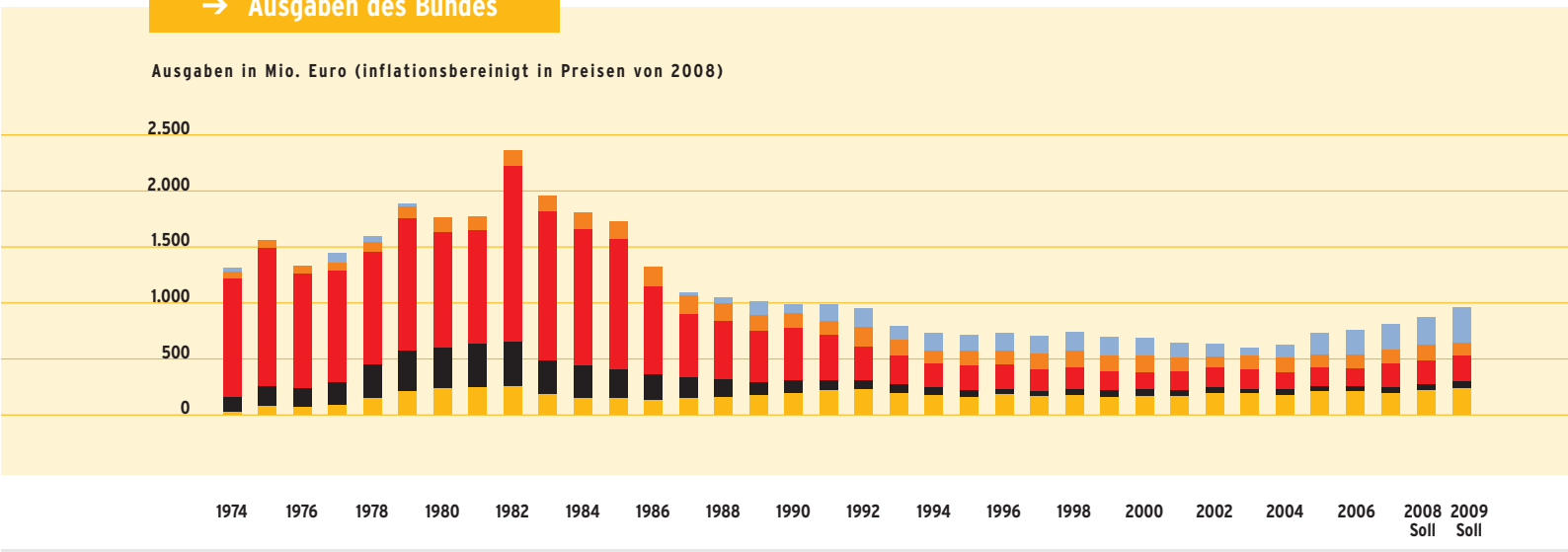
Aber auch in den anderen Bereichen der erneuerbaren Energien wird die Forschungsförderung auf hohem Niveau fortgesetzt. Um die ambitionierten Ausbauziele der Bundesregierung zu erreichen, werden alle erneuerbaren Energien gebraucht. Eine Übersicht über sämtliche geförderten Projekte findet sich unter: www.erneuerbare-energien.de

Potenziale erneuerbarer Energien

Auf unserer Erde sorgt ein außerordentlich großes Angebot an unerschöpflichen Energieströmen dafür, dass prinzipiell ein Vielfaches unseres Energiebedarfs mit erneuerbaren Energien und ohne Rückgriff auf endliche Ressourcen gedeckt werden kann. Zur Verfügung stehen die eingestrahlte Solarenergie, die kinetische Energie des Windes, der Meereswellen und der Meeresströmungen, die jährlich nachwachsende Biomasse, die potenzielle Energie des Wassers in Flüssen und Seen, die geothermische Energie und die Wärmeenergie der Meere. Diese **Energieströme entsprechen etwa dem 3.000-fachen des jährlichen Weltenergieverbrauchs**. Aus diesem theoretischen Potenzial erneuerbarer Energien (Grafik "Natürliches Angebot erneuerbarer Energien";

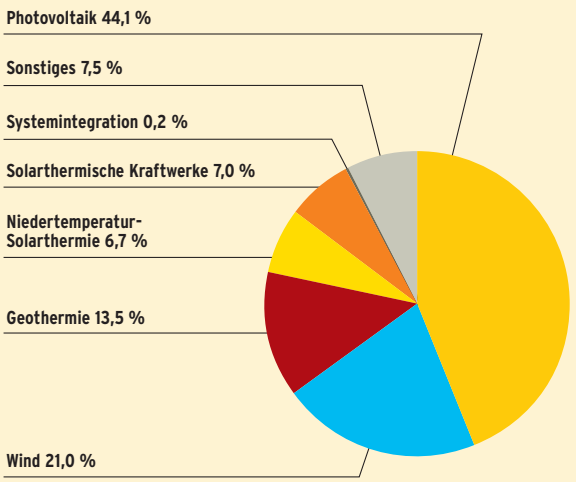
→ Ausgaben des Bundes

Quelle: BMBF, Statistisches Bundesamt



Ausgaben des Bundes für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung nach Förderbereichen und Förderschwerpunkten

→ Forschungsförderung



Anteil am durchschnittlichen Abfluss der Fördermittel der Bundesregierung im Durchschnitt der Jahre 2005 bis 2008

große Würfel im Hintergrund) lassen sich die **Nutzungspotenziale** ableiten, welche die möglichen Energieerträge in einer für den Endverbraucher nutzbaren Form – also Wärme verschiedener Temperatur, Elektrizität und Brenn- oder Treibstoffe – bereitstellen. Bei der Ermittlung dieser sogenannten "technischen Potenziale" sind verschiedene Kriterien zu beachten:

- **Grenzen für Wirkungsgrade, Anlagengrößen und technische Entwicklungspotenziale** der derzeit vorhandenen oder in absehbarer Zeit verfügbaren Nutzungstechniken;

- **Strukturelle Restriktionen** wie Nutzungseinschränkungen infolge der Ortsgebundenheit (bei der Erdwärme), ein begrenzter Transportradius (bei der Biomasse), die Verfügbarkeit von Flächen oder Konkurrenznutzungen (bei Kollektoren, Solarzellen, Energiepflanzenanbau), eine nicht vorhandene Infrastruktur (wie noch nicht ausgebaute Wärmenetze), begrenzte Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Energiedarbietung (bei Strom aus fluktuierenden Quellen wie Wind oder Solarstrahlung), und weitere nicht-technische Restriktionen wie beispielsweise die Akzeptanz der Bevölkerung;

- **Ökologische Restriktionen** hinsichtlich der Flächenbeanspruchung (bei der Windenergie oder Solarenergie), der Beeinträchtigung von Fließgewässern (bei der Wasserkraft) und Landschaftsbildern (Windenergie) sowie eingeschränkte Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse (etwa Reststoffe aus Forst- und Landwirtschaft; Energiepflanzenanbau).

Diese technischen Potenziale erneuerbarer Energien sind somit keine für alle Zeiten unverrückbare Größe. Sie liefern einen Orientierungsrahmen für das innerhalb eines längeren Zeitraums Machbare und zeigen, welche Bedeutung die einzelnen Energiequellen und Nutzungstechnologien für die betrachteten Länder oder Regionen haben können. Vom technischen Potenzial ist das **realisierbare** oder **erschließbare Potenzial** abzugrenzen. Es beschreibt den Beitrag der erneuerbaren Energien, der in einem langfristigen Zeitraum (beispielsweise 50 Jahre) tatsächlich zu erwarten ist.

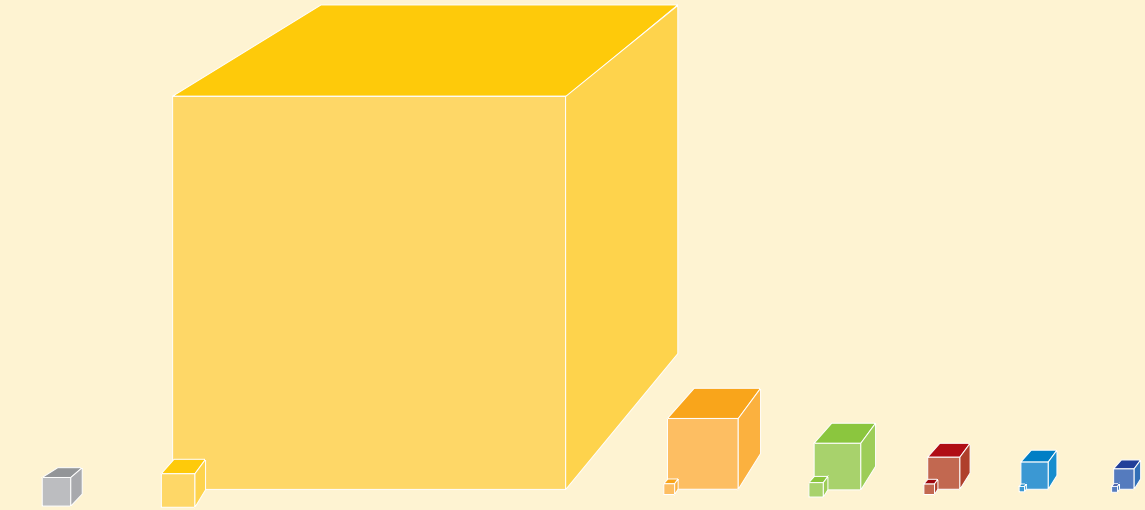
Unter Beachtung dieser einschränkenden Kriterien sind von den natürlichen Energieströmen nur wenige Promille (Solarstrahlung, Wind) bis Prozente (Biomasse, Erdwärme) energetisch nutzbar (Würfel im Vordergrund). Lediglich bei der bereits konzentrierten Wasserkraft ist eine technische Nutzung im Bereich von 10 % möglich.

Das global realisierbare Potenzial der erneuerbaren Energien liegt aber selbst bei strengen Restriktionen in der Größenordnung des Sechsfachen des derzeitigen weltweiten Bedarfs an Endenergie. Die Flächen zur Nutzung von Solarstrahlung sind bei dieser beispielhaften Abschätzung auf 2 % der globalen Landfläche begrenzt worden, was rund 10 % der nicht für Siedlungen, Wald und Landwirtschaft derzeit genutzten Fläche entspricht. Die potenziellen Anbauflächen für Energiepflanzen beanspruchen rund 5 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Etwa zwei Drittel davon stellt die Strahlungsenergie der Sonne. Erneuerbare Energien können also im Prinzip auch einen weiter steigenden Energiebedarf der Menschheit vollständig und auf Dauer decken. Beiträge erneuerbarer Energiequellen im Bereich von 50 % und mehr am Weltenergieverbrauch werden darum in verschiedenen Zukunftsentwürfen bereits bis Mitte diesen Jahrhunderts für möglich gehalten (siehe Kapitel "Perspektiven erneuerbarer Energien").

Allerdings variiert das Angebot an erneuerbaren Energien räumlich sehr stark. Dies zeigt das Beispiel solarthermischer Kraftwerke (siehe S. 83). Für diese Technologie, die die Solarstrahlung in konzentrierter Form verwendet, liegen die Regionen mit dem größten Potenzial alle im so genannten "Sonnengürtel" der Erde, also zwischen dem 20. und 40. Breitengrad der südlichen und nördlichen Hemisphäre (siehe Grafik "Globales technisches Potenzial"). Dafür sind vor allem die tropische Bewölkung im Bereich des Äquators und die Tiefdruckgebiete in den Westwindzonen verantwortlich. Ein ähnliches Muster ergibt sich auch für photovoltaische Systeme. Allerdings hat hier die Bewölkung einen weniger starken Einfluss, da die Photovoltaik auch diffuse Strahlung nutzt. Verstärkt werden die räumlichen Potenzialunterschiede, wenn technische Einschränkungen und Abzüge für nicht nutzbare oder anderweitig genutzte Flächen berücksichtigt werden, beispielsweise Siedlungsflächen, Wald und landwirtschaftliche Flächen, Gewässer und Sümpfe, Dünen, Schutzgebiete oder Flächen, die auf Grund zu hoher Geländeneigung nicht für die Ener-

→ Natürliches Angebot erneuerbarer Energien

Quelle: DLR



Weltenergieverbrauch
Solarstrahlung auf Kontinente
Wind
Biomasse
Erdwärme
Meereswärme / Wellenenergie
Wasser

Hintere Würfel: Das natürliche Angebot der erneuerbaren Energien ist außerordentlich groß. Vordere Würfel: Die daraus technisch gewinnbaren Energiemengen in Form von Strom, Wärme und chemischen Energieträgern übertreffen den derzeitigen Weltenergieverbrauch (grauer Würfel, links) um etwa das Sechsfache.

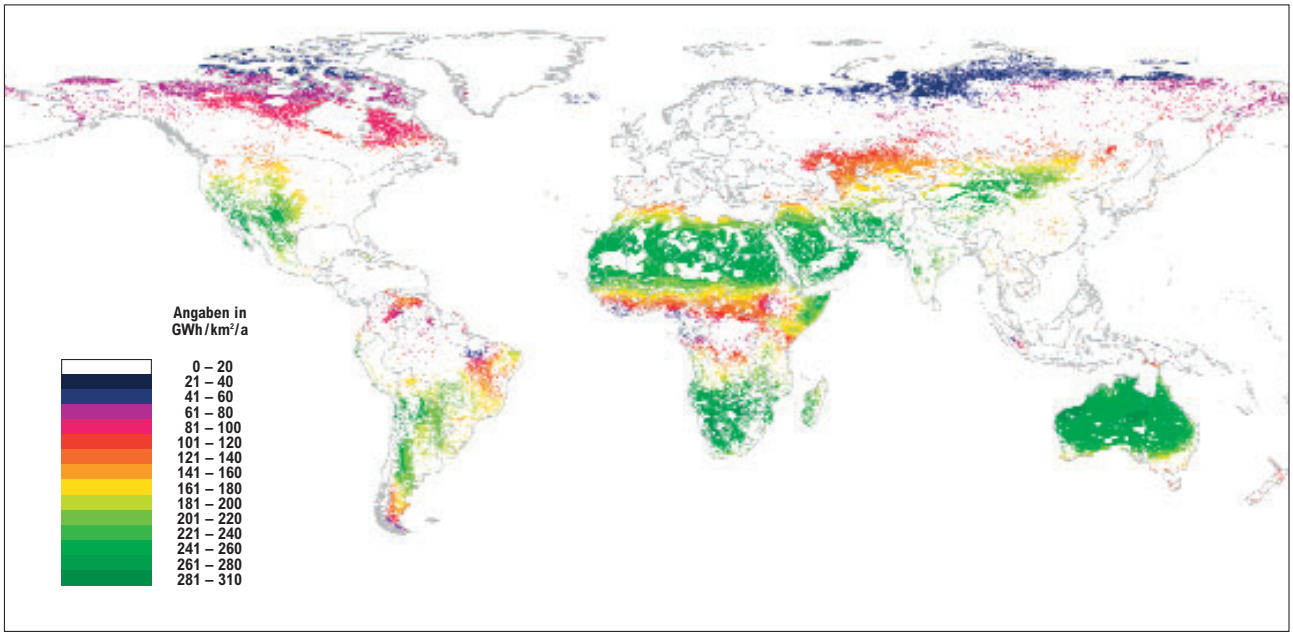
giebereitstellung geeignet sind. Wie die Weltkarte zeigt, haben Nordafrika, die arabische Halbinsel und Australien ein enorm hohes Potenzial für die solarthermische Stromerzeugung. Allein in Nordafrika könnte mehr als das Hundertfache des Weltstrombedarfs mittels solarer Kraftwerke bereitgestellt werden. Nordafrikanische Standorte liefern mit 200 bis 300 GWh/km²/a auf jedem Quadratkilometer Landfläche genau soviel Energie wie ein konventionelles Kraftwerk mit 50 MW Leistung und 6.000 Volllastbetriebsstunden pro Jahr. Auch der Mittelmeerraum eignet sich als Lieferant von Solarstrom. Die in Spanien prinzipiell verfügbaren Flächen- und Einstrahlungspotenziale reichen rechnerisch sogar aus, um so viel Strom zu produzieren, wie Europa heute verbraucht.

Das technische Potenzial der Windenergie hängt wieder von anderen Faktoren ab: Über den Landmassen der Kontinente, wo die raue Geländestruktur den Wind abbremst, ist die mittlere Windgeschwindigkeit deutlich niedriger als über den Weltmeeren, wo der Wind nahezu ungebremst weht. Eine der stürmischsten Regionen der Welt ist die Nordsee. Aber auch an Land gibt es Lagen, an denen durch besondere Geländeformen hervorragende Windverhältnisse zu finden sind. Durch die höheren Masten heutiger Generationen von Windenergieanlagen steigt die Energieausbeute gegenüber alten Anlagen deutlich.

Insgesamt variiert das technische Potenzial der einzelnen erneuerbaren Energiequellen räumlich stark – nicht in jedem Land ist jede Energiequelle verfügbar. Bestimmte Regionen verfügen offensichtlich über sehr kostengünstige Potenziale. Je breiter also die Vielfalt der genutzten Energiequellen und Technologien ist – Sonnenenergie, Wind, Geothermie, Biomasse, Wasserkraft –, desto eher können regionale Defizite bei einer Energiequelle durch Potenziale anderer Energiequellen ausgeglichen werden. Unter dem Gesichtspunkt der regionalen Potenziale ist eine Diversifizierung von Energiequellen und Technologien also sehr sinnvoll. In praktisch jedem Land harren attraktive Segmente erneuerbarer Energien auf ihre Nutzung. Bestimmte Regionen mit sehr großen Potenzialen erneuerbarer Energien können darüber hinaus längerfristig zu Lieferanten kostengünstiger Sekundärenergien werden. So kann der heutige Welthandel mit fossilen Energien langfristig durch einen entsprechenden Handel mit erneuerbaren Energien in Form von Elektrizität und Wasserstoff abgelöst werden. So könnte beispielsweise am Golf aus dem Erdöl-Emirat Abu Dhabi das Solar-Emirat Abu Dhabi werden.

Das realisierbare Potenzial der erneuerbaren Energien liegt bei einem Mehrfachen des derzeitigen weltweiten Bedarfs an Endenergie.

Quelle: DLR



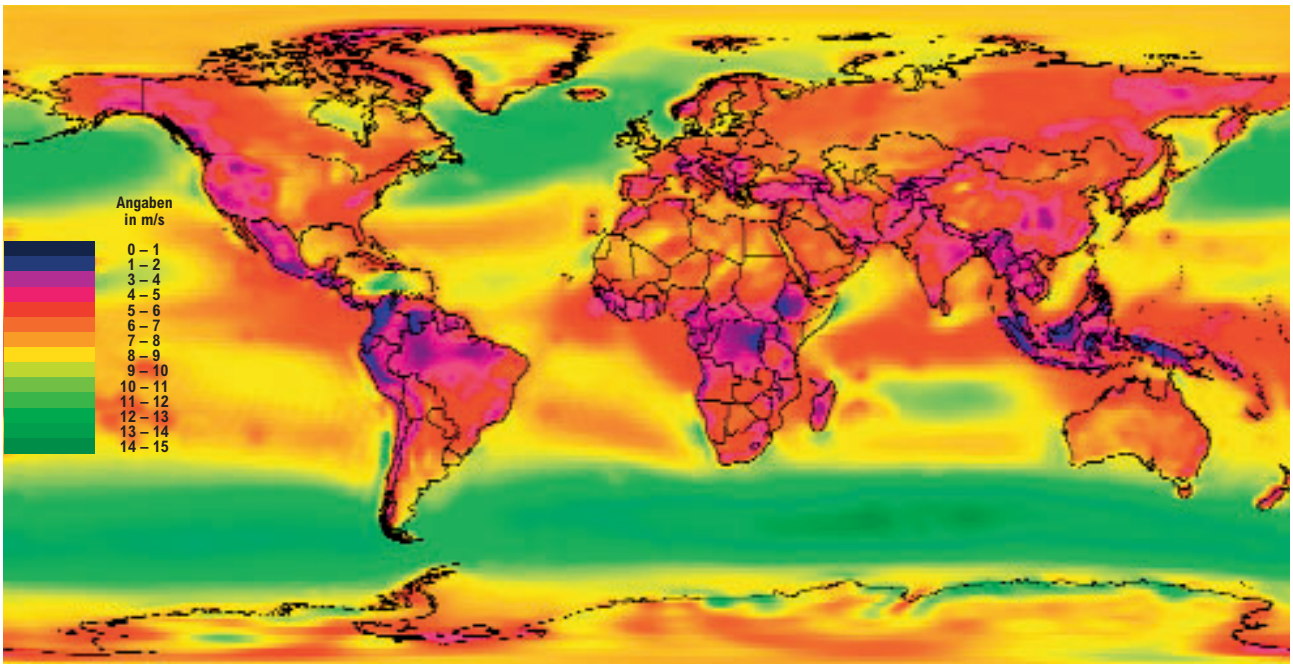
Globales technisches Potenzial der Stromerzeugung aus solarthermischen Kraftwerken. Angegeben ist der elektrische Energieertrag in einem Jahr bezogen auf einen Quadratkilometer verfügbarer Landfläche.

Potenziale für Europa

Europa verfügt über eine große Vielfalt erneuerbarer Energieressourcen, die bisher sehr unterschiedlich ausgeschöpft werden. Das realisierbare Wasserkraftpotenzial ist mit 80 % bereits weitgehend erschlossen, wenn man die Errichtung neuer Kraftwerke an naturbelassenen Flüssen ausschließt. Auch die Biomasse wird bereits in größerem Umfang genutzt. Allerdings liegen gerade im Bereich Biomasse auch noch große Potenziale brach. Die anderen Möglichkeiten erneuerbarer Energiebereitstellung werden bisher nur zu Bruchteilen ausgenutzt. Insgesamt steht in Westeuropa ein gesichertes technisches Potenzial erneuerbarer Energien von mindestens 40.000 PJ pro Jahr zur Verfügung, dies entspricht etwa 60 % des gegenwärtigen Primärenergieverbrauchs der EU-25 Länder.

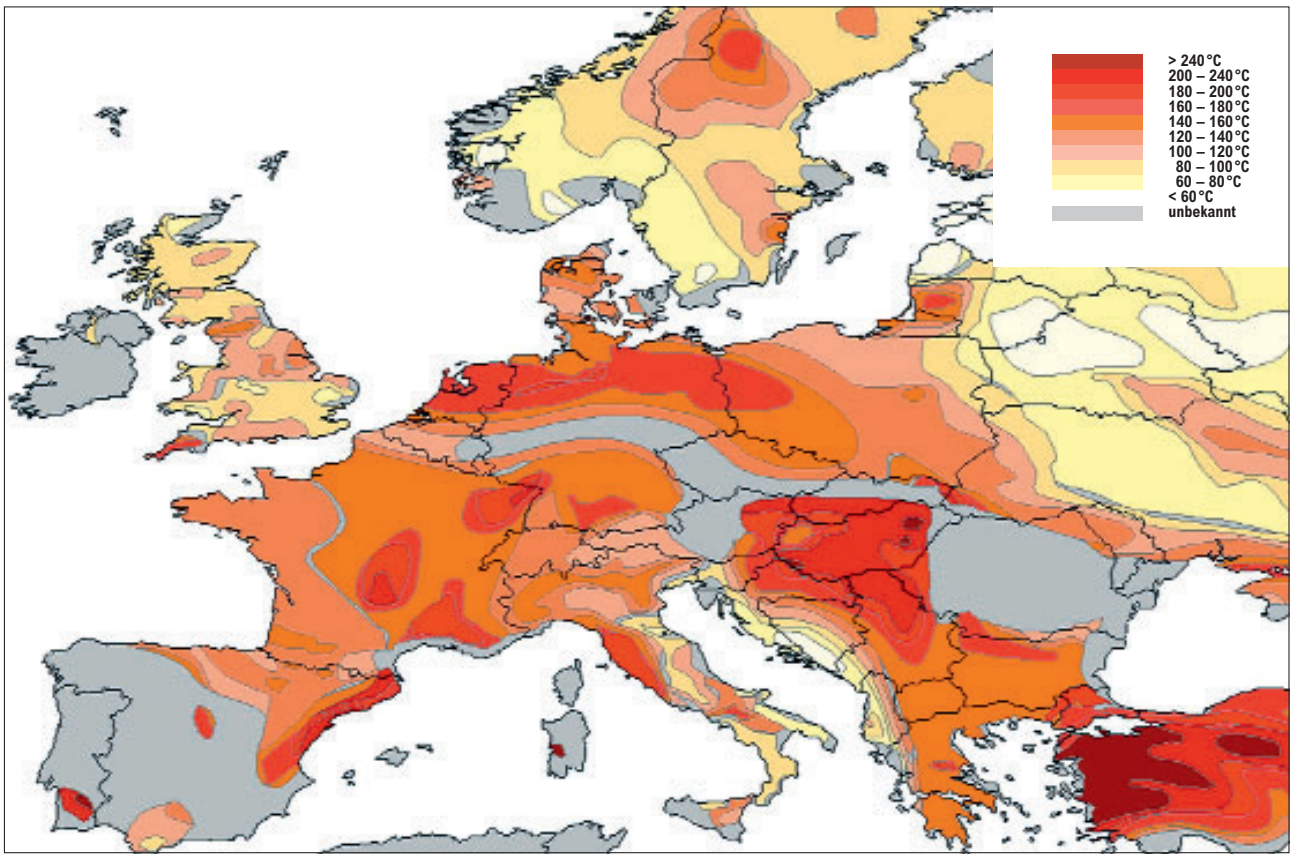
Sind alle erneuerbaren Energien erst einmal in der zukünftigen Energieversorgung etabliert, können in den

Quelle: DLR



Langfristige Mittelwerte der Windgeschwindigkeit in 80 m Höhe über Grund in m/s.

Quelle: Bestec 2004



Temperaturen der Gesteinsschichten in 5.000 m Tiefe in Europa als Indikator für die vorhandenen geothermischen Stromerzeugungspotenziale.

nächsten Dekaden weitere Potenziale erschlossen werden. Einige Beispiele dafür sind:

- eine ausgedehntere Nutzung von Windenergie auf See an europäischen Küsten mit rund 2.000 TWh/a zusätzlicher Stromerzeugung;
- Energiepflanzenanbau auf zusätzlichen landwirtschaftlichen Stillegungsflächen von insgesamt 30 Mio. ha mit zusätzlich 3.500 PJ/a Primärenergie;
- Nutzung weiterer Geothermieressourcen mit Stromerzeugungspotenzialen in Westeuropa bis zu 1.700 TWh/a;
- Strom aus solarthermischen Kraftwerken mit Standorten in Nordafrika im Rahmen eines mediterranen Stromverbunds in der Größenordnung einiger 10.000 TWh/a.

Zusammen ergibt dies ein zusätzliches Primärenergiepotenzial von mehr als 80.000 PJ pro Jahr, mit dem prinzipiell auch ein steigender Energiebedarf Westeuropas langfristig mit erneuerbaren Energien gedeckt werden kann.

Die unterschiedliche Verfügbarkeit der Ressourcen Sonne, Wind, Wasserkraft, Erdwärme und Biomasse in den einzelnen europäischen Ländern macht deutlich, dass die Potenziale Europas und vor allem auch Nordafrikas durch eine engere Vernetzung und Zusammenarbeit der Regionen gemeinsam für eine nachhaltige Energieversorgung genutzt werden sollten. Auf diese Weise können erneuerbare Energien Teil einer internationalen Kooperation zum globalen Klimaschutz und zur nachhaltigen Entwicklung werden.

Potenziale für Deutschland

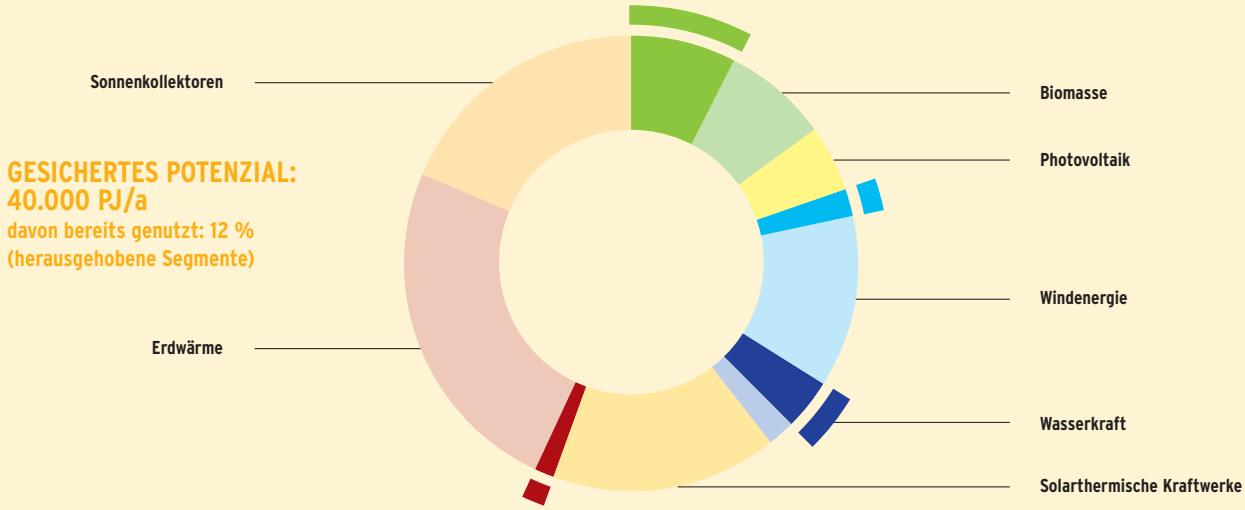
Deutschland ist ein gutes Beispiel dafür, wie ein Land mit gemäßigtem Klima auf eine Vielfalt von erneuerbaren Energien zurückgreifen und damit beträchtliche Anteile seines Energiebedarfs decken kann. Entscheidend ist dabei nicht nur das theoretische Potenzial, das die Natur zur Verfügung stellt, sondern auch das tatsächlich **realisierbare Potenzial**, das die technischen Einschränkungen, die Kapazitätsgrenzen der Hersteller, die Akzeptanz der Bevölkerung und andere Faktoren berücksichtigt.

Das kostengünstigste Potenzialsegment für Strom liegt bei der restlichen Wasserkraft, der Biomasse und der Windenergie an günstigen Standorten. Auch wenn das rein technische Potenzial der **Wasserkraftnutzung** in Deutschland mit bis zu 40 TWh/a angegeben wird, schätzen verschiedene Studien das auch unter ökologischen Vorbehalten heute noch verfügbare realisierbare Ausbaupotenzial übereinstimmend auf 25 TWh/a – also ein Ausbau um weitere 3 bis 5 TWh/a.

Das technische Potenzial der **Windenergienutzung** auf dem deutschen Festland für Standorte mit mittleren bis guten Windgeschwindigkeiten wird auf ca. 240 TWh/a

→ Europäische Potenziale

Quelle: DLR

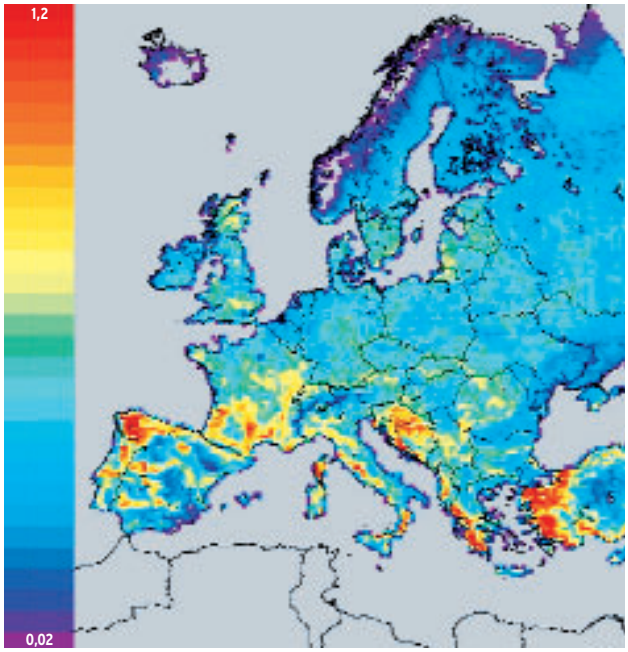


Gesichertes Potenzial erneuerbarer Energien in Westeuropa. Nur Wasserkraft und Biomasse werden bisher in größerem Ausmaß genutzt.

geschätzt. Über die Hälfte davon entfällt auf Regionen mit einer mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit zwischen 5,5 und 6 m/s. Ein großer Teil der Gebiete mit gutem bzw. sehr gutem Potenzial werden allerdings bereits zur Windstromerzeugung genutzt. Eine Möglichkeit für den weiteren Ausbau ist das Repowering, also der Austausch von veralteten kleineren Windenergieanlagen durch moderne Großanlagen.

Die im Rahmen des Repowering auf der verfügbaren Fläche zu installierende Kapazität dürfte wesentlich von

Quelle: DLR



Durch Photosynthese erzeugte Biomasse in Millionen Tonnen Kohlenstoffeinheiten pro Jahr

der in den Flächennutzungsplänen festgelegten zulässigen maximalen Höhe der Anlagen abhängen. Ausgehend von den in verschiedenen Regionen Deutschlands bis heute ausgewiesenen Eignungsflächen wird angenommen, dass zukünftig insgesamt rund ein halbes Prozent der Fläche in Deutschland für die Windenergienutzung zur Verfügung stehen wird, wobei die Anteile in den Küstenregionen größer und im Binnenland deutlich kleiner sind. Das realisierbare Ausbaupotenzial kann damit, je nach Anlagengröße, bis zu 45.000 MW betragen. Es handelt sich dabei ausdrücklich um eine "weiche" Potenzialgrenze, die nicht primär aus naturschutzfachlichen Belangen abgeleitet ist und vor allem auch langfristig die soziale Akzeptanz der Windenergienutzung sicherstellen soll. Es ist dabei durchaus denkbar, dass während der Phase eines eher langsam einsetzenden Ausbaus der Offshore-Windparks diese Grenze für den Ausbau an Land zunächst überschritten wird, um einen kontinuierlich steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung zu gewährleisten. Wird eine sorgfältige Standortplanung vorausgesetzt, so stehen einem solchen Ausbau Naturschutzkriterien nicht als limitierender Faktor gegenüber.

Da es sich bei der **Windenergienutzung auf See** um einen großflächigen und langfristigen Eingriff in die Meeresumwelt handelt und die anlagenbezogenen Auswirkungen von Offshore-Windparks mangels praktischer Erfahrung nur mit Unsicherheit prognostiziert werden können, soll zur Wahrung des Vorsorgeprinzips ein stufenweiser Ausbau realisiert werden. Nach einem Abgleich verschiedener Nutzungsinteressen sind von der Bundesregierung erste konfliktarme Flächen identifiziert worden, die unter den gegenwärtigen Bedingungen für die Startphase und die erste Ausbauphase als besondere Eignungsgebiete für Offshore-Windparks in

Betracht kommen. Langfristig könnte sich die erschließbare Kapazität auf 35.000 MW auf den verfügbaren Flächen erhöhen. Auch dies ist keine harte Potenzialgrenze. Mit steigenden Wassertiefen und damit steigenden Stromgestehungskosten könnte diese Kapazität weiter erhöht werden.

Das realisierbare Potenzial der **Photovoltaik** wird durch das Strahlungsangebot an der Modulfläche, die verfügbaren Flächen für die Aufstellung der Anlagen und deren in Zukunft erreichbaren Jahresnutzungsgrad bestimmt. Überlegungen zu einer praktikablen und ökonomisch sinnvollen Einbindung von PV-Anlagen in bestehende Siedlungsstrukturen, also unter Nutzung von Dachflächen, Fassaden, Überdachungen, Lärmschutzwänden etc., sowie die Beachtung der konkurrierenden Nutzungsmöglichkeiten durch thermische Kollektoren für Warmwasser und Raumheizung legen einen verfügbaren Flächenanteil von rund 700 km² nahe. Daraus leitet sich bei einem mittelfristig erreichbaren Jahresnutzungsgrad von 15 % ein Stromerzeugungspotenzial von über 100 TWh/a bzw. knapp dem Viertel des gegenwärtigen Verbrauchs ab, dies entspricht einer Leistung von 115 Gigawatt. Dieses sehr eingegrenzte realisierbare Potenzial ist noch so beträchtlich, dass es innerhalb der nächsten Jahrzehnte nur in relativ geringem Maße ausgeschöpft werden kann. Durch die vorsichtige Nutzung geeigneter Freiflächen kann das technische Potenzial noch erheblich gesteigert werden.

Um eine nachhaltige Nutzung der Ressource **Erdwärme** zu gewährleisten, sollte das technische Potenzial wegen des geringen natürlichen Wärmestroms nur innerhalb eines sehr langen Zeitraums sukzessive erschlossen werden. Das theoretische Potenzial der Erdwärme ist immens und liegt bei rund 300.000 TWh. Dieses Potenzial kann allerdings nur über einen langen Zeitraum hinweg erschlossen werden, da eine einmal abgekühlte Gesteinsformation Jahrhunderte benötigt, um wieder die ursprüngliche Temperatur zu erreichen. Studien gehen deshalb davon aus, dass nur etwa ein Tausendstel davon realisierbar ist.

Wird diese geothermische Ressource mittels der ökologisch und ökonomisch wünschenswerten Kraft-Wärme-Kopplung genutzt, schränkt sich das Potenzial weiter ein, weil Geothermiekraftwerke nur an Standorten sinnvoll sind, wo Kunden die Wärme abnehmen. Damit wäre das Potenzial auf rund 70 TWh/a beschränkt.

Das Potenzial der **Biomasse** (siehe S. 98) setzt sich zusammen aus Reststoffen und Anbaubiomasse. Ausgehend von 2,5 Mio. ha Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe (siehe S. 104) und den Möglichkeiten der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen könnte unter günstigen Randbedingungen insgesamt ein Anteil von rund 9 % des derzeitigen Primärenergieverbrauchs durch Biomasse gedeckt werden. Wie sich diese auf die einzelnen Segmente Stromerzeugung, Wärme und Verkehr verteilen, ist nicht zuletzt eine politische Entscheidung, die sich an der ökonomischen und ökologischen Sinnhaftigkeit orientieren sollte.

Das Gesamtpotenzial der Stromerzeugung liegt damit zwischen rund 480 und 760 TWh/a und damit in der Größenordnung heutiger Stromerzeugung (siehe Grafik "Potenziale erneuerbarer Energien"). Hinzu kommt der dann mögliche Stromimport aus erneuerbaren Energien aus anderen Ländern.

In ähnlicher Weise wie das Stromerzeugungspotenzial lässt sich das Potenzial zur **Nutzwärme** strukturieren. Das theoretische Potenzial zur Erzeugung hydrothermaler **Erdwärme** kann berechnet werden und liegt etwa bei dem 300-fachen des deutschen Wärmebedarfs. Berücksichtigt man technische Restriktionen und die begrenzten Möglichkeiten, diese Wärme über weite Strecken zu transportieren, reduziert sich dieses Potenzial auf etwa ein Viertel der deutschen Wärmenachfrage. Für diese Anwendungen werden vor allem hydrogeothermale Ressourcen im Norddeutschen Becken, im Oberrheingraben und im süddeutschen Molassebecken genutzt werden. Eine ähnliche Analyse führt bei der Nutzung der heißen Gesteine beispielsweise mittels Hot Dry Rock (siehe S. 118) zu einem Angebotspotenzial von rund 800 TWh/a.

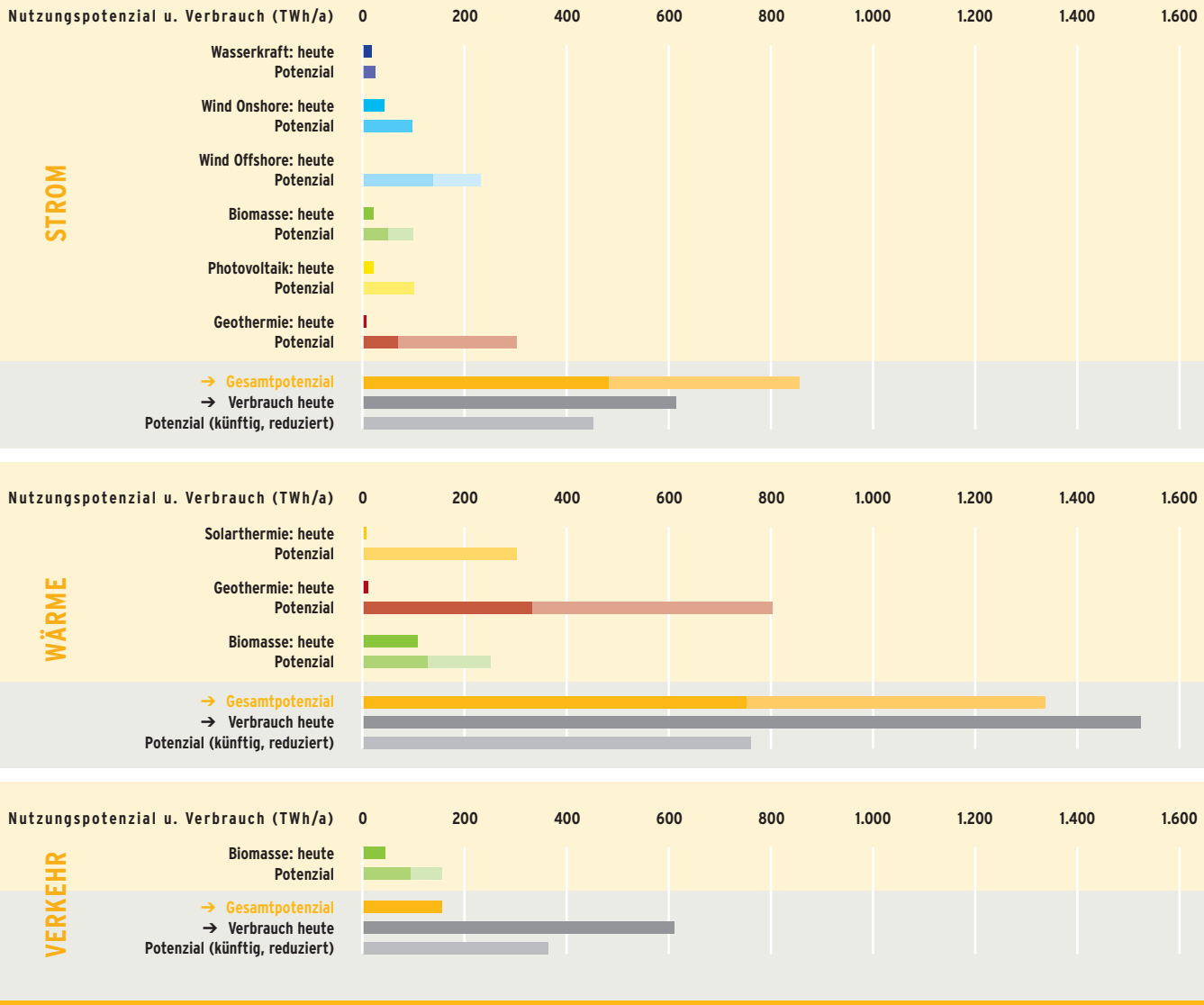
Für die **solarthermische Wärmeerzeugung** werden geeignete Stellflächen für Kollektoren benötigt. Hierfür kommen in erster Linie Dächer sowie die Mehrfachnutzung geeigneter Siedlungsflächen wie beispielsweise Lärmschutzwälle oder Parkplatzüberdachungen in Frage. Nach Abzug des von Photovoltaikanlagen genutzten Anteils steht in Deutschland eine Fläche von knapp einer Milliarde Quadratmeter zur Verfügung, entsprechend einem jährlichen solaren Ertrag von ca. 290 TWh/a.

Insgesamt ergibt sich ein Nutzungspotenzial von mindestens rund 800 TWh pro Jahr (Endenergie), was gut der Hälfte der heute zur Wärmeerzeugung eingesetzten Brennstoffmenge entspricht – je nach Annahmen für die Verteilung der Biomasse und die Entwicklung der Geothermie auch deutlich mehr. Zukünftig wird der Raumwärmebedarf wegen besserer Gebäudestandards und der Sanierung des Gebäudebestandes außerdem deutlich sinken: der Anteil erneuerbarer Energien kann auch dadurch kräftig gesteigert werden.

Aus der bisher geringen Ausschöpfung des Potenzials der erneuerbaren Energien sollte nicht der Schluss gezogen werden, dass allein wirtschaftliche Erwägungen eine schnelle Ausweitung erneuerbarer Energien beeinträchtigen. Von ebenso großer Bedeutung für ihre kontinuierliche, möglichst ungestörte Erschließung ist die Berücksichtigung der Investitionszyklen im Gebäude- und Kraftwerksbereich. Ein beschleunigter Ausbau erfordert daher die rechtzeitige und vorrangige Einbeziehung erneuerbarer Energien in alle Planungen und Investitionsentscheidungen, welche die Energieversorgung und insbesondere den Siedlungsbereich betreffen.

→ Potenziale erneuerbarer Energien

Quelle: IFEU



Das vorsichtig abgeschätzte langfristig realisierbare Ausbaupotenzial erneuerbarer Energien im Vergleich zur heutigen Nutzung (die Aufhellung der Potenzialbalken steht für die mögliche Bandbreite)

Das Potenzial erneuerbarer Energien im **Verkehrsbereich** hängt davon ab, in welchen Anwendungen die Biomasse eingesetzt wird. Allein mit deutschen Reststoffen und Flächen ist im Prinzip mindestens ein Viertel des heutigen Kraftstoffbedarfs zu decken. Verschiedene Studien weisen nach, dass ein Einsatz der Biomasse in der Strom- und Wärmeerzeugung Vorteile bezüglich der Einsparung von Klimagasen und Ressourcen aufweist. Hinzu kommen allerdings die sorgfältig ausgewählten Importmöglichkeiten von nachhaltig im Ausland erzeugter Biomasse, Einsparpotenziale bei den Fahrzeugen und die Möglichkeit, elektrischen Strom in Elektroautos einzusetzen (siehe S. 61).

Auch andere erneuerbare Energieträger wie feste Holzpellets oder Strom aus Ländern im Sonnengürtel können nach Deutschland importiert werden – sie sind in dieser Potenzialabschätzung nicht enthalten.

Die längerfristige Perspektive

Die Potenziale für erneuerbare Energien sind also da. Die Bundesregierung setzt daher auf einen dynamischen Ausbau der erneuerbaren Energien. Dazu hat sich die Regierung konkrete Ziele gesetzt:

- Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf mindestens 30 % bis zum Jahr 2020 und anschließend ein weiterer kontinuierlicher Ausbau.
- Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Wärmeversorgung auf mindestens 14 % bis zum Jahr 2020.
- Erhöhung des Anteils von Biokraftstoffen am Kraftstoffverbrauch auf rund 12 % bis zum Jahr 2020. Der Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch des gesamten Verkehrs soll im Jahr 2020 zehn Prozent betragen.

– Im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie wird ein Anteil erneuerbarer Energien an der gesamten Energieversorgung von 50 % im Jahr 2050 angestrebt.

Ergänzend wird die Strategie mit dem Ziel verfolgt, die Energieeffizienz der Volkswirtschaft bis 2020 gegenüber 1990 zu verdoppeln.

Die Ziele sind ambitioniert, aber realistisch. Die entstandene Dynamik der erneuerbaren Energien lässt erwarten, dass das 30 %-Ziel des Jahres 2020 erreicht oder übertroffen wird. Damit werden erneuerbare Energien zu einem gleichberechtigten und unverzichtbaren Partner im Strommarkt.

Bemerkenswert ist, dass viele ältere Szenarien bereits nach wenigen Jahren von der Wirklichkeit deutlich überholt wurden. Während die Prognose der Enquete-Kommission im Jahr 2002 noch sehr pessimistisch war, steigt der Anteil der erneuerbaren Energien in aktuelleren Studien wie dem "Energiereport IV" aus dem Jahr 2005 oder den Szenarien aus dem Energiegipfel von 2007 deutlich stärker (siehe Grafik "Mögliche Entwicklung der Stromerzeugung").

Im Bereich der Wärmebereitstellung ist der Anteil der erneuerbaren Energien in den letzten Jahren ebenfalls merklich gestiegen. Trotzdem ist hier der Nachholbedarf bedeutend größer als im Strom- und Kraftstoffbereich. Mit dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz

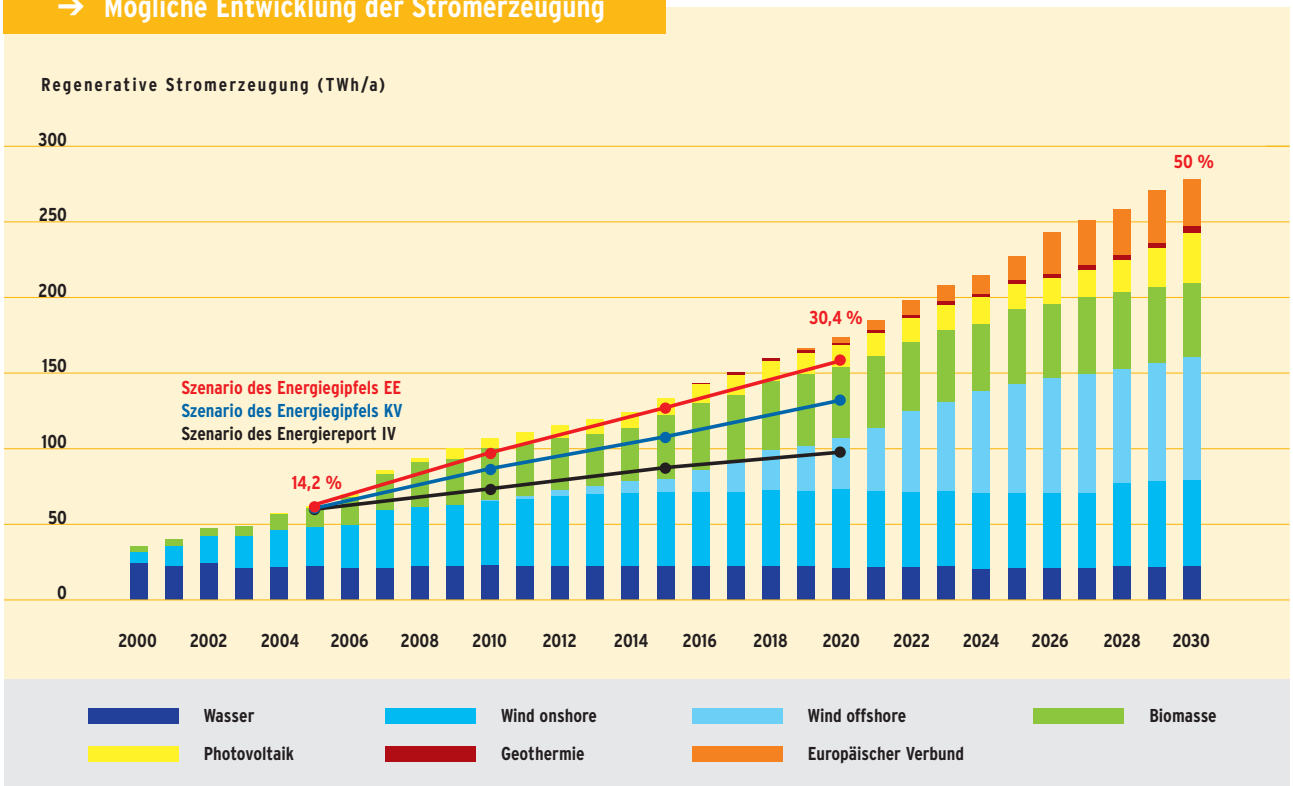
Derzeit wird weniger als ein Zehntel des langfristig realisierbaren Potenzials an erneuerbaren Energien in Deutschland genutzt.

und dem im Mittelvolumen deutlich aufgestockten Marktanreizprogramm ist ein Ausbau auf 14 % bis 2020 und auf knapp 50 % bis 2050 realistisch. Im Sinne einer Gesamtstrategie sind parallel zusätzliche Maßnahmen im Bereich der Wärmedämmung und bei der Wärmeversorgung mit Nahwärmenetzen und der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung erforderlich.

Erneuerbare Energien decken also zunehmend den Energiebedarf in Deutschland. Lässt sich die beschriebene Wachstumsdynamik in den einzelnen Segmenten aufrechterhalten, so ist ein Anteil von über 18 % am Endenergiebedarf entsprechend dem europäischen Ausbauziel im Jahr 2020 erreichbar. Die angestrebte Steigerung der erneuerbaren Energien bis 2020 wird sich deutlich auf die Emissionsbilanz Deutschlands auswirken. Bereits 2008 hat ihr Einsatz rund 109 Mio. Tonnen Kohlendioxid vermieden (siehe S. 20), bis zum Jahr 2020 wird es knapp das Doppelte sein. Bis zur Mitte diesen Jahrhunderts sollte jedoch eine Reduktion des gesamten energiebedingten CO_2-Ausstoßes um 80 bis 95 %

→ Mögliche Entwicklung der Stromerzeugung

Quelle: DLR



Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nach der "Leitstudie 2008" bis 2030 im Vergleich zu älteren Szenarien

gegenüber dem Niveau des Jahres 1990 erreicht werden. Diesen Empfehlungen nationaler und internationaler Experten trägt die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung Rechnung. Um das Ziel erreichen zu können, muss neben die Säule "Gesteigerte Effizienz bei der Umwandlung und Nutzung von Energie" in gleichem Maße die Säule "Erneuerbare Energien" treten. Das Ziel der Bundesregierung lautet: "Bis Mitte des Jahrhunderts sollen erneuerbare Energien rund die Hälfte des Energieverbrauchs decken."

Orientiert man ein Szenario an diesem Ziel, so müssen erneuerbare Energien und Energieeffizienz und Einsparung weiter an Bedeutung gewinnen. Mit der **Leitstudie 2008** hat das Bundesumweltministerium dazu die derzeit aktuellste Untersuchung vorgelegt. Im "Leitszenario 2008" wird gezeigt, wie es möglich ist, den Primärenergieverbrauch deutlicher zu senken als bei der unter den derzeitigen Rahmenbedingungen absehbaren Entwicklung.

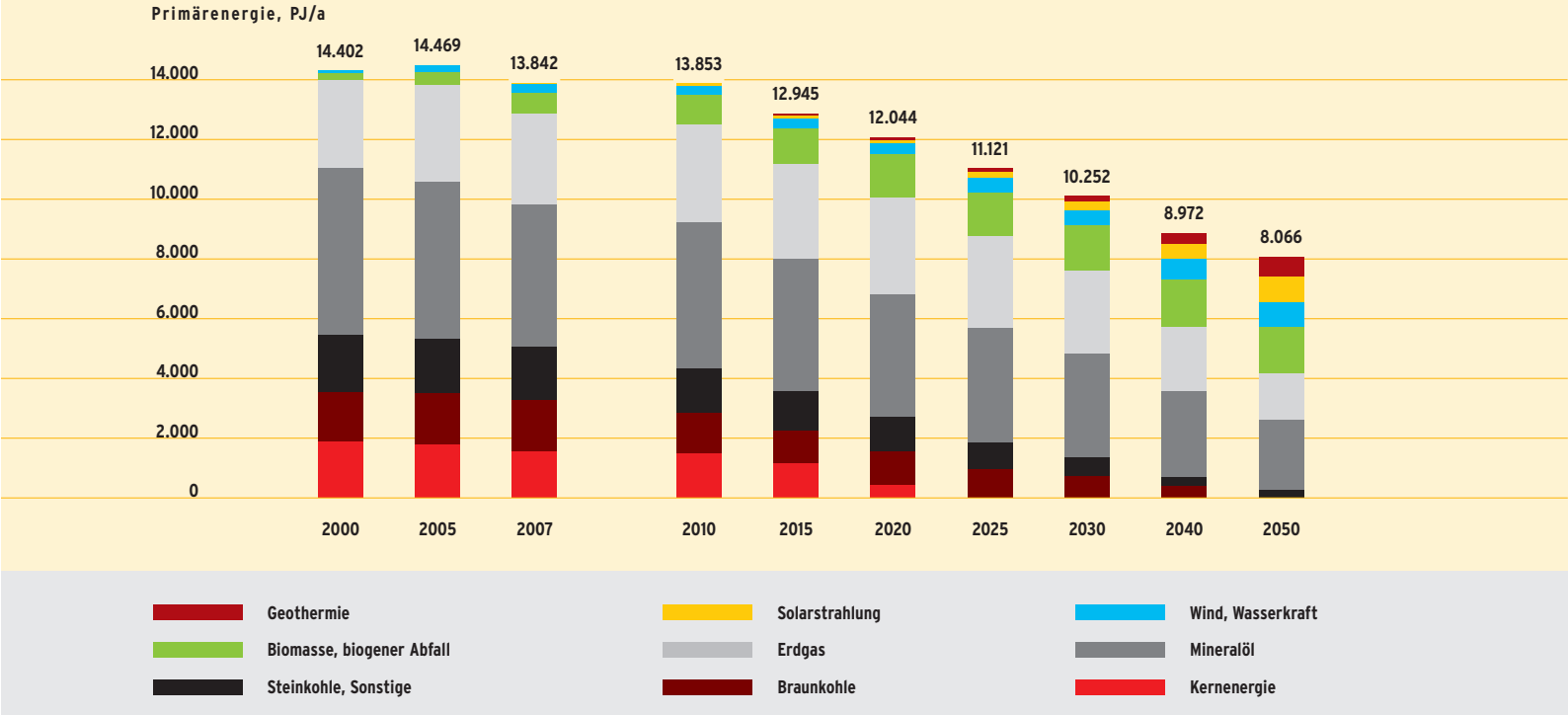
Das Leitszenario geht von zwei Prämissen aus: Ein ambitionierter Klimaschutz ist notwendig, und das bedeutet eine Minderung der deutschen CO_2-Emissionen um mindestens 80 % bis 2050. Zum zweiten geht das Leitszenario davon aus, dass auf Grund der Risiken der Atomtechnologie und der ungelösten Frage der Endlagerung von Atommüll an einem Ausstieg aus der Atomenergie konsequent festgehalten wird. Zur Erreichung dieser Ziele ist es notwendig, Effizienz in allen Sektoren, erneuerbare Energien und Kraft-Wärme-Kopplung simultan umzusetzen.

Die Effizienzstrategie bewirkt bis zum Jahr 2050 eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs um über 40 % gegenüber 2007 und ermöglicht es dadurch, den Beitrag der erneuerbaren Energien bis dahin auf 48 % des verbleibenden Verbrauchs zu steigern, ohne dass es zu einer extremen Ausschöpfung von Einzelpotenzialen kommen müsste. Da jede Art der Energienutzung auch Wirkungen auf unsere natürliche Umwelt hat – bei fossilen und nuklearen Energien ungleich größere als bei erneuerbaren Energien –, gewährleistet diese Strategie auch einen weitgehenden Schutz natürlicher Lebensräume.

Im Kraftwerksektor ergibt sich in den nächsten Jahrzehnten aufgrund der Alterstruktur der fossilen Kraftwerke und des Abschaltens von Kernkraftwerken ein umfangreicher Erneuerungs- und Ertüchtigungsbedarf von einigen zehn Gigawatt Leistung. Im Jahr 2020 sind voraussichtlich weniger als die Hälfte der Kraftwerke des Jahres 2000 in Betrieb. Zur Deckung des bis dahin gesunkenen Strombedarfs werden im Leitszenario knapp 90 GW neue Kraftwerksleistung installiert. Davon sind im Leitszenario fast 60 GW erneuerbare Energieanlagen. Im Jahr 2030 wird bereits mehr als die Hälfte des Strombedarfs aus erneuerbaren Energien bereitgestellt, im Jahr 2050 sind es gut 80 %. Die seit 2000 installierten Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energieträger erzeugen in diesem Szenario in jedem Jahr mehr Strom, als

→ Primärenergie im Leitszenario 2008

Quelle: DLR



Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern in einem Langfristszenario für Deutschland

→ Effizienz und Sparen - wichtige Voraussetzungen für die optimale Nutzung erneuerbarer Energien

Die Potenziale zur Erhöhung der Energieeffizienz werden heute bei weitem nicht ausgeschöpft. Selbst dann nicht, wenn sie mittel- bis langfristig wirtschaftlich sind. In einer Wirtschaft, die sich vorrangig an den Bedingungen eines liberalisierten und globalisierten Marktes orientiert, werden Amortisationszeiten von nur wenigen Jahren gefordert. So schnell machen sich Energiesparinvestitionen oft nicht bezahlt.

Sowohl in privaten Haushalten als auch in den meisten Betrieben stellen die Energiekosten nur einen kleinen Kostenfaktor dar. Die möglichen Kostensenkungen sind also im Vergleich zu anderen Ausgabenbereichen wie den Arbeitskosten gering. Erst wenn sich Energiepreise in Relation zu anderen Kosten deutlich verändern – auch dadurch, dass die externen Effekte der Energieproduktion eingepreist werden –, sind größere Erfolge bei der rationellen Energienutzung zu erwarten. Aber selbst wenn Sparmaßnahmen unter den heutigen Bedingungen steigender Energiepreise wirtschaftlich und mit entsprechend kurzer Amortisationsdauer durchgeführt werden können, unterbleiben sie in der Realität häufig. Es gibt eine Vielzahl von Hemmnissen oder Trägheiten – beispielsweise unzureichende Informationen über technische Verbesserungsmöglichkeiten oder ein zu sorgloser Konsum.

Beispiel Mietwohnung: Die Bewohner eines Gebäudes sind nicht an Erdgas oder Heizöl interessiert, sondern an einer warmen, behaglichen Wohnung. Diese Dienstleistung kann man nicht nur mit einer entsprechenden Heizung, sondern genauso gut auch durch eine verbesserte Dämmung und angepasste Bauweise erbringen. Die dazu erforderlichen Anfangsinvestitionen müssen der langjährigen Energieeinsparung gegen gerechnet werden. Obwohl sich das über die Lebenszeit der Maßnahmen häufig rechnet, unterbleibt die energetische Sanierung. Gründe hierfür sind eine geringe Kapitalverfügbarkeit und die aus der unklaren Entwicklung der Energiepreise resultierenden Unsicherheiten. Hinzu tritt vielfach das Vermieter-Mieter-Dilemma – die Mehrkosten infolge der Investitionen müsste der Vermieter auf die Miete umlegen können, da ja der Mieter ständig Heizkosten einspart.

Im Umwandlungsbereich kann der Wirkungsgrad durch den Einsatz moderner Gas- Dampf- (GuD)- Kraftwerke und weiterentwickelter Kohlekraftwerke noch erheblich gesteigert werden. Vor allem aber die verstärkte Nutzung der Abwärme von Kraftwerken mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) über Nah- und Fernwärmenetze sowie in dezentralen Einzelanlagen senkt die hohen Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung deutlich (siehe S. 58).

Die Potenziale zur Energieeinsparung sind beträchtlich. Analysen gehen von bis zu 50 % des derzeitigen Energieverbrauchs aus, ohne dass an Energiedienstleistungen Abstriche gemacht werden müssten. Ein großer Anteil wäre durch eine beschleunigte energetische Modernisierung von Altbauten, ein weiterer beträchtlicher Anteil durch die rasche Einführung sparsamerer Fahrzeuge mobilisierbar. Aber auch in anderen Bereichen wie den elektrischen Haushaltsgeräten und der Industrie sind noch erhebliche Einsparungen möglich. In der Summe wird eine Reduktion der Energieintensität um 3 % pro Jahr über einen längeren Zeitraum für möglich gehalten. Damit könnte der Energieverbrauch – auch bei einem vergleichbaren Wirtschaftswachstum wie in der Vergangenheit - absolut zurückgehen.

Moderne und effiziente Technologien, die hier zum Einsatz kommen, wären auch ein hervorragendes Exportgut in Volkswirtschaften mit hohem Nachholbedarf an Energiedienstleistungen – etwa China, Indien oder die USA. So könnte Deutschland eine Vorreiterrolle wie bei den erneuerbaren Energien einnehmen, und davon in einigen Jahren auch wirtschaftlich profitieren.

durch den Kernenergieausstieg wegfällt. Von den übrigen 30 GW dürfen – der Szenariophilosophie eines strengen Klimaschutzszenarios folgend – maximal 10 GW Kohlekraftwerke bis 2020 installiert werden; inklusive der Kraftwerke, die derzeit im Bau und in Planung sind. Die übrigen 20 GW sind zentrale und dezentrale Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung auf Gasbasis.

Für diesen Ausbau der effizienten Kraft-Wärme-Kopplung spielen kleine und dezentrale Anlagen eine besondere Rolle. Sie eröffnen der Kraft-Wärme-Kopplung neue Anwendungsgebiete im unteren Leistungsbereich durch die verstärkte Versorgung auch von kleineren Einzelobjekten. Langfristig kann die Leistung dieser dezentralen Kraftwerke im Leitszenario auf insgesamt 17 GW wachsen.

Im Jahr 2050 ist praktisch der gesamte Kraftwerkspark erneuert. Den größten Teil der installierten Leistung tragen dann Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien bei. Durch die verschiedenen Maßnahmen reduzieren sich die CO_2-Emissionen allein im Umwandlungssektor bis 2020 um 40 % und bis 2050 um 85 % gegenüber dem Jahr 2000. Dies zeigt, dass die Atomenergie zur Erreichung des Klimaschutzziels nicht benötigt wird. Im Gegenteil: Das Leitszenario zeigt, dass ein konsequenter Ausstieg notwendig ist, um den Umbau hin zu einer regenerativen Energiewirtschaft nicht zu blockieren.

Das Leitszenario geht davon aus, dass ähnliche Kombinationen aus Effizienzsteigerungen und dem Ausbau erneuerbarer Energien auch in der Wärmeversorgung und im Verkehr umgesetzt werden. Kurz- bis mittelfristig dominieren hier verstärkte Effizienzbemühungen, mittel- bis langfristig wächst die Bedeutung des Beitrags der erneuerbaren Energien.

Folgen andere Länder dieser oder einer ähnlichen Strategie – was angesichts der zusammenwachsenden Märkte eine wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen Umbau der Energieversorgung in Deutschland ist – können neben den heimischen erneuerbaren Energiequellen auch ausländische Ressourcen kostengünstig genutzt werden. Dies kann mittelfristig der Import von Windenergiestrom von ertragsreichen europäischen Küstenregionen sein, längerfristig aber ebenso der Import von Strom aus Solarkraftwerken im Mittelmeerraum über ein verstärktes europäisches Verbundnetz (siehe S. 50). Im Leitszenario liegt der Beitrag dieses Import-Stroms im Jahr 2050 bei gut einem Fünftel der gesamten Stromerzeugung. Wegen der beträchtlich reduzierten Anteile von Uran, Erdgas, Steimkohle und Mineralöl am Primärenergieverbrauch ist dennoch die Abhängigkeit von Energieimporten wesentlich geringer als heute.

Im Leitszenario 2008 wurden auch verschiedene Varianten gerechnet; sowohl solche, in denen energiepolitische Defizite auftreten und die Klimaschutzziele nicht erfüllt werden, als auch Szenarien, in denen Effizienz und erneuerbare Energien noch dynamischer verfolgt werden. In diesen ehrgeizigen Szenarien führt die Kombination von Effizienz- und erneuerbaren Energiemaßnahmen zu einem Anteil von erneuerbaren Energien an der gesamten Energieversorgung von fast zwei Dritteln. Entscheidend für die ökonomischen Auswirkungen des Leitszenarios sind die kommenden Energiepreise und die Kosten des Emissionshandels. Geht man in einer eher zurückhaltenden Analyse davon aus, dass der Rohölpreis auf real rund 110 US-Dollar je Barrel im Jahr 2030 steigt, so steigen die Kosten einer forcierten Effizienzstrategie gegenüber einer Weiter-So-Entwicklung einige Jahre leicht an, fallen dann aber zu Beginn der nächsten Dekade deutlich ab: Schon ab 2020 fallen keine Differenzkosten mehr an; in den Jahren danach ist der Entwicklungspfad des Leitszenarios volks- und betriebswirtschaftlich kostengünstiger als die Trendentwicklung – selbst ohne Berücksichtigung externer Kosten. Der Ausbaupfad von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz entfaltet also eine preisstabilisierende Wirkung, die dazu führt, dass die Energieversorgung insgesamt überhaupt bezahlbar bleibt. Die bis 2020 noch zu erbringenden zusätzlichen Aufwendungen erweisen sich damit als vorausschauende Investition in eine dauerhaft tragfähige Energieversorgung.

Berücksichtigt man zusätzlich die externen Kosten der Energieversorgung (siehe S. 19), beispielsweise die Klimaschadenskosten, so weist der Beitrag erneuerbarer Energien bereits heute eine volkswirtschaftlich positive Bilanz auf.

Erneuerbare Energien in der Europäischen Union

Das Europäische Parlament und die Europäische Kommission haben bereits in der Vergangenheit wichtige Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien in Europa gesetzt. Beispielhaft dafür ist das Ziel von 1997, den Beitrag erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2010 zu verdoppeln. Ausschlaggebend für die Aktivitäten der EU ist auch, dass mehr als die Hälfte des europäischen Energiebedarfs aus Importen gedeckt wird.

Strukturveränderungen in der Energieversorgung brauchen Zeit. Deshalb müssen heute die Weichen für die Zukunft gestellt werden. Angesichts der Herausforderungen, denen sich Europa in den nächsten Jahren und Jahrzehnten gegenübersieht, und angesichts der jüngsten Entwicklungen an den internationalen Energiemärkten haben die europäischen Institutionen Ende 2008 im Rahmen des europäischen Klimapaketes eine neue Richtlinie verabschiedet, die verbindliche Ziele für Europa und die einzelnen Mitgliedsstaaten festschreibt. Mit der neuen Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (2209/28/EG) ist für 2020 ein verbindlicher Anteil erneuerbarer Energien an der Endenergieversorgung von 20 % und am Energiebedarf im Transportsektor von 10 % festgelegt. Daraus ergeben sich Verpflichtungen für die einzelnen Mitgliedsstaaten. Deutschland muss nach dieser Richtlinie einen Anteil von 18 % erreichen. Dies deckt sich mit den Zielen der Bundesregierung und den Ergebnissen der Leitstudie 2008.

Den größten Beitrag zur Energieversorgung aus erneuerbaren Energien in Europa leistet die Biomasse, die vor allem zum Heizen verwendet wird. Beim Strom wurden etwa 450 TWh aus erneuerbaren Energien erzeugt, dies entspricht einem Anteil von gut 14 % an der Bruttostromerzeugung. Zwei Drittel davon stellt die Wasserkraft, jeweils rund 80 TWh/a Biomasse und Wind. Der Beitrag der Windenergie steigt kontinuierlich mit 25 Prozent jährlichem Zuwachs. Allein im Jahr 2007 kamen Anlagen mit über 8.500 Megawatt hinzu, vor allem in Spanien und Deutschland. Der Anteil des Solarstroms ist energiewirtschaftlich mit 2,2 TWh/a noch unbedeutend, verzeichnet allerdings eine starke Zunahme.

Das Beispiel der Windenergie zeigt allerdings auch, dass die Erfolge bei der Erschließung erneuerbarer Energien in den EU-Staaten sehr unterschiedlich sind, und man noch weit von einem erfolgreichen Gleichschritt entfernt ist. Dies liegt weniger an den natürlichen Potenzialen als vielmehr an den jeweiligen energiepolitischen Rahmenbedingungen der einzelnen Mitgliedsstaaten.

Speziell das EEG steht im internationalen Vergleich gut da. So stellte die Europäische Kommission 2008 fest, dass Einspeiseregelungen wie das deutsche EEG sehr effektiv bei der Förderung der Windenergie sind. Die in einzelnen Ländern realisierten Quotensysteme mit handelbaren Zertifikaten können dagegen keine vergleichbaren Erfolge aufweisen (siehe S. 33) . Auch sind die Kosten höher als in den Ländern mit Einspeiseregelungen, obwohl theoretisch die durch Quotenregelungen etablierten Marktmechanismen niedrigere Vergütungen erwarten lassen. Das wird durch die höheren Risiken für Anlagenbetreiber zunichte gemacht. Während das deutsche EEG eine vorab auf 20 Jahre festgelegte Vergütung gesetzlich garantiert, sind in einer Quotenregelung die Erlöse aus dem Verkauf des Stroms und der Zertifikate höchst unsicher und hängen von einer Vielzahl von schwer abschätzbaren Faktoren ab. Durch das EEG hat Deutschland das Ausbauziel für 2010 bereits erreicht. Daneben gelingt dies aus heutiger Sicht voraussichtlich nur noch Dänemark, Spanien sowie Finnland.

Erneuerbare Energien global

Im internationalen Maßstab spielen erneuerbare Energien je nach Region eine ganz unterschiedliche Rolle. Besonders hoch ist ihre Bedeutung in den weniger entwickelten Regionen, insbesondere in Afrika, wo sie oft in Form von Feuerholz fast die Hälfte des Energiebedarfs decken. Diese “traditionelle Nutzung von Biomasse” ist jedoch meist nicht nachhaltig. Einfache Formen des

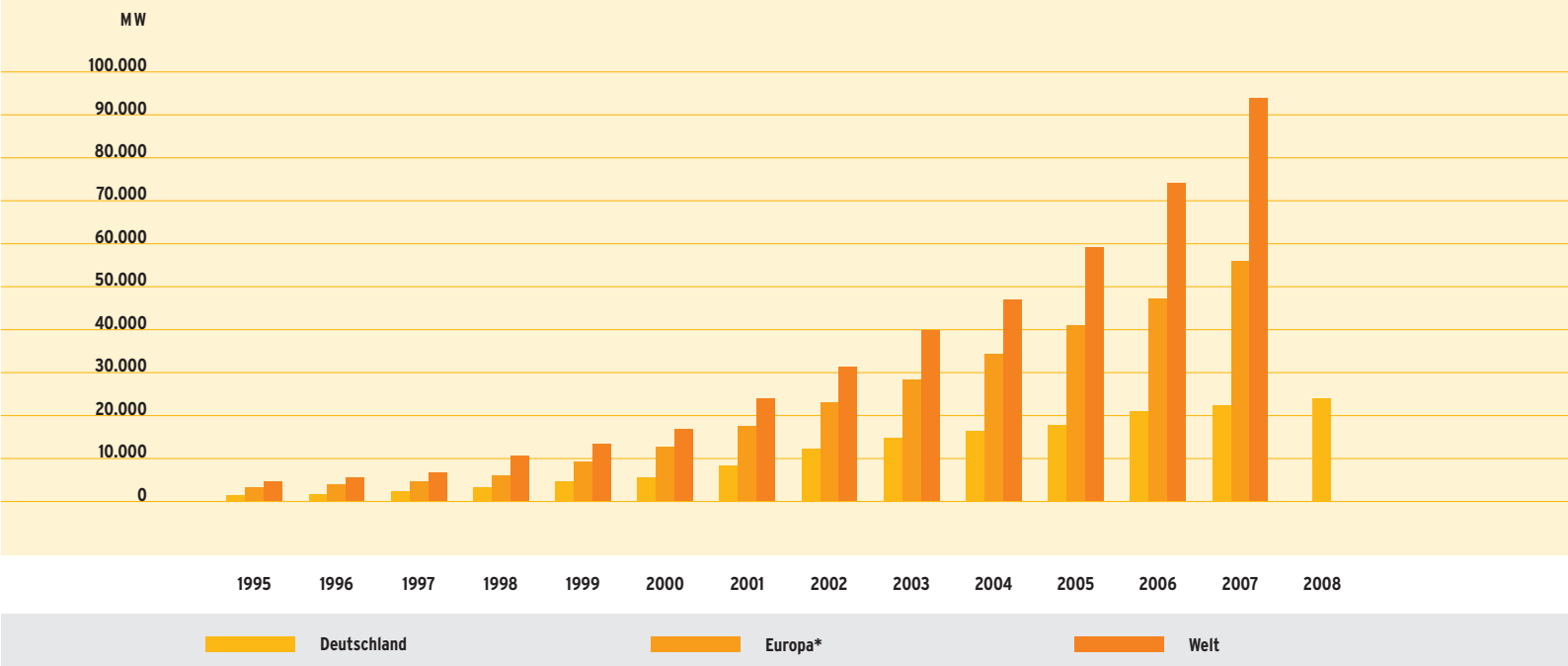
Die Struktur der Energieversorgung ändert sich nur langsam. Die Weichen müssen heute gestellt werden.

Kochens und Heizens haben Gesundheitsschäden durch offenes Feuer sowie den Raubbau der Wälder zur Folge. Die Nutzung der Wasserkraft durch große Staudämme ist oft auch nicht nachhaltig, da sie mit gravierenden sozialen und ökologischen Folgen einhergehen kann. Die erfolgreiche Bekämpfung der Armut ist eine Grundvoraussetzung für den Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung. Steigende Einkommen in den Entwicklungs- und Schwellenländern führen heute jedoch in aller Regel zu einem steigenden Bedarf an den fossilen Energieträgern.

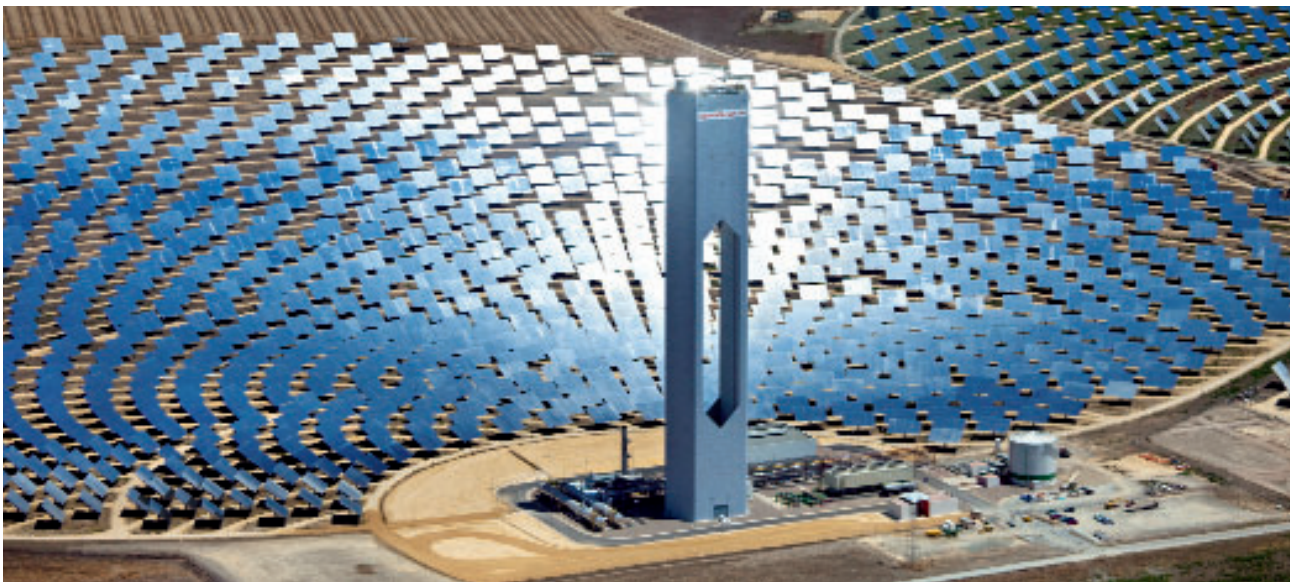
Viele dieser Länder laufen im Zuge einer nachholenden Industrialisierung Gefahr, sich die Energieversorgung nicht mehr leisten zu können, da ihr Energieverbrauch steigt und die Öl- und Gas-Ressourcen immer knapper werden. Auch wenn bereits in der Vergangenheit versucht wurde, dieser Entwicklung durch eine intensivere und nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien vorzubeugen, sind die Ergebnisse bisher ernüchternd. Zwar hat sich die Energiebereitstellung aus erneuerbaren

→ Installierte Windleistung

Quellen: EWEA, BWE, GWEC



Entwicklung der installierten Windleistung in Deutschland (bis 2008), der EU und weltweit in den Jahren 1995 bis 2008.
* Ab 2003 einschließlich installierter Leistungen der neuen Mitgliedsstaaten. Für 2008 nur Werte für Deutschland.



Das weltgrößte Solarturmkraftwerk steht in Spanien und produziert 20 Megawatt elektrische Leistung. 1.255 Spiegel reflektieren die Sonnenstrahlung auf den Receiver des 160 m hohen Solarturms.

Energien in den letzten etwa 30 Jahren annähernd verdoppelt, gleichzeitig stieg aber auch die Nutzung von Kohle, Öl, Erdgas und Atomenergie. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Weltenergieverbrauch von gut 13 % ist deshalb nicht angewachsen.

Im Gegensatz zu Deutschland und Europa, wo durch die Effizienzpotenziale ein kurz- bis mittelfristiger Rückgang des Energiebedarfs möglich ist, wird der Weltenergiebedarf weiter deutlich ansteigen. Wesentliche Ursachen hierfür sind das Bevölkerungswachstum und der weitere Anstieg des Weltbruttosozialprodukts. Die absolute Höhe des Energieverbrauchs hängt aber auch stark von der Entwicklung der Energieintensität ab. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung hat in seinem Gutachten "Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit" ein Szenario mit sehr dynamisch wachsender Weltwirtschaft entwickelt. Der darin unterstellten Versechsfachung des Weltbruttosozialprodukts bis 2050 steht eine jährliche Abnahme der Energieintensität von 1,5 % pro Jahr gegenüber, so dass sich der Primärenergiebedarf – ähnlich wie in anderen Szenarien mit deutlichem Wachstum – knapp verdreifacht. Die zentrale Bedeutung der erneuerbaren Energien zeigt sich daran, dass sie 2050 den größten Beitrag zur Energiebedarfsdeckung bereitstellen.

Was passiert, wenn die Regierungen dieser Welt in der Energiepolitik nicht gründlich umsteuern, beschreibt aktuell eine der wichtigsten Energieprognosen der Welt, der "World Energy Outlook 2008" der Internationalen Energieagentur (www.iea.org). In einem Referenzszenario mit einer Politik des Weiter-So prognostiziert der Bericht bis 2030 eine Zunahme des weltweiten Primärenergieverbrauchs von 45 Prozent, also einem jährlichen Wachstum um 1,6 %. Mehr als die Hälfte dieses Zuwachses geht dabei auf das Konto der "nachholenden Industrialisierung" Chinas und Indiens. Die globale Dominanz der fossilen Energieträger Kohle, Öl und Erdgas bleibt in dem Weiter-So-Szenario der IEA bestehen, sie werden dann im weltweiten Energiemix 2030 mit 80 Prozent nur geringfügig weniger wichtig sein als heute. Der Ölverbrauch soll um jährlich 1 % von derzeit 85 Millionen Barrel täglich weiter auf 105 Millionen Barrel zulegen.

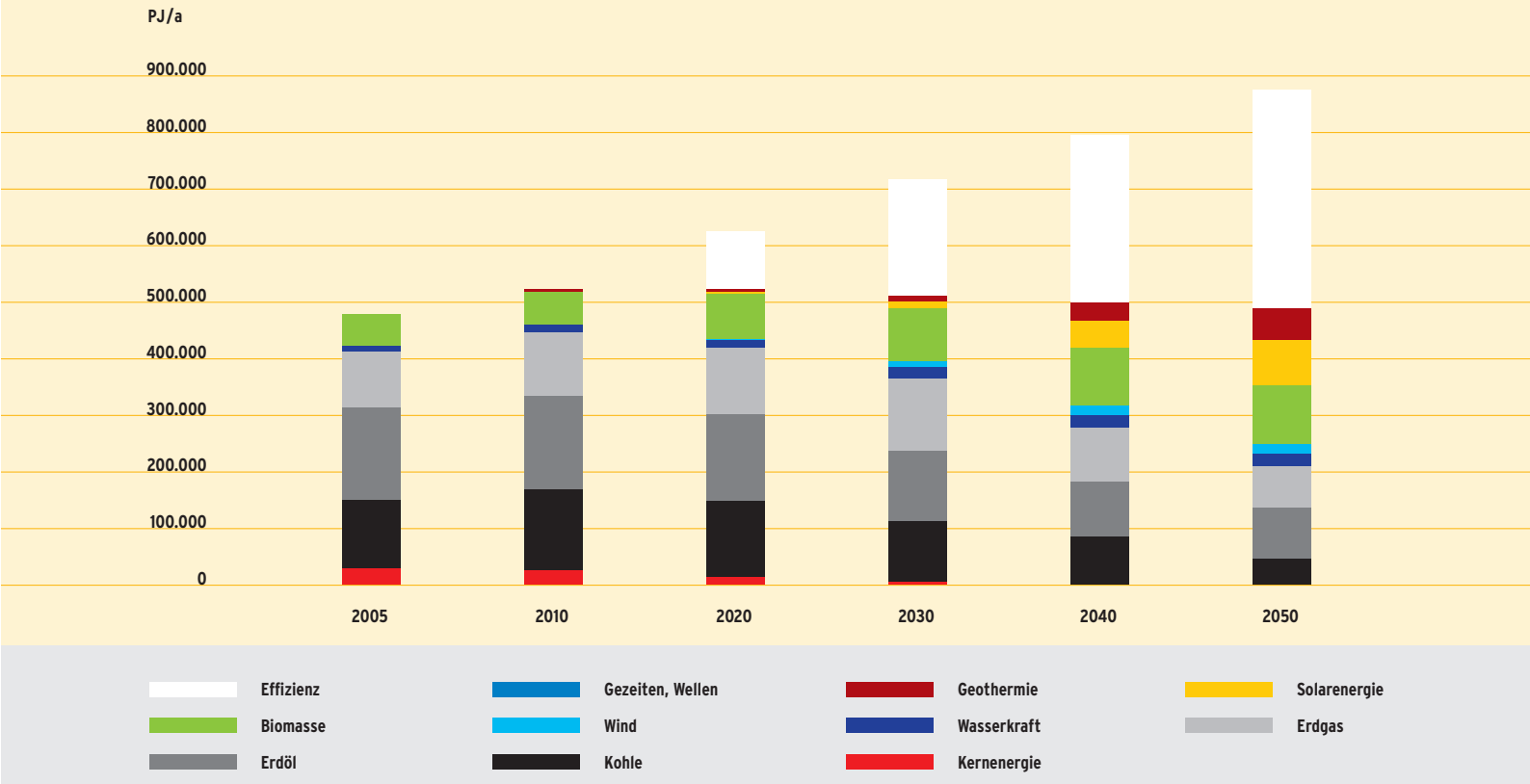
Die Konsequenzen einer solchen Entwicklung beschreibt die IEA allerdings auch. "Ohne einen Politikwandel steuert die Welt auf eine Temperaturzunahme von sechs Grad Celsius zu." In den internationalen Klimaverhandlungen haben sich die Regierungen inzwischen darauf geeinigt, dass eine Zunahme von mehr als zwei Grad vermieden werden muss.

Wesentlich ist es also, dass wir umsteuern. Und andere Szenarien zeigen, dass dies möglich ist. Beispielsweise wurde ein Energy [R]evolution-Szenario vorgestellt, dass die Pro-Kopf-Emissionen an CO_2 im Jahr 2050 auf 1,3 Tonnen begrenzt; dies entspricht einer Reduktion der absoluten CO_2-Emissionen um 50 % gegenüber 1990. Das Energy [R]evolution-Szenario setzt auf verschiedene Maßnahmen: eine drastische Steigerung der Energieeffizienz in allen Ländern, einen konsequenten Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung sowie erneuerbare Energien, die im Jahr 2050 fast 80 % der weltweiten Stromversorgung und 70 % des Wärmebedarfs abdecken (siehe Grafik "Energy [R]evolution-Szenario").

Das Szenario einer "Energy [R]evolution" geht von einem konstanten Pro-Kopf-Energieverbrauch aus, so dass weiteres Wirtschaftswachstum mit deutlich sinkender Energieintensität einhergeht. Die modernen Industriestaaten halbieren ihren Energieeinsatz als Beitrag zur Milderung der krassen Ungleichverteilung des weltwei-

→ Energy [R]evolution-Szenario

Quelle: Greenpeace



Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in einem globalen Klimaschutz-Szenario. Verstärkte Energieeffizienz und eine ausgewogene Mobilisierung aller erneuerbarer Energiequellen führt zu einer Halbierung des Beitrags fossiler Primärenergien bis zum Jahr 2050.

ten Energieverbrauchs. Dies erlaubt eine gute Verdopplung des Pro-Kopf-Verbrauchs der heutigen Entwicklungsländer und sichert ihrer wachsenden Bevölkerung im Jahr 2050 einen Anteil von 75 % am Primärenergieverbrauch. Die Verringerung weiterer Nachhaltigkeitsdefizite verlangt eine Halbierung des fossilen Energieeinsatzes bis 2050, ein Auslaufen der Atomenergienutzung und eine Umstellung der häufig umweltschädlichen "traditionellen" Biomassenutzung (Brennholzbeschaffung) auf eine umweltverträgliche "moderne" Biomassenutzung. Der Einsatz moderner Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien müsste demnach bis 2050 über 50 % des Gesamtenergiebedarfs decken. Die Herausforderungen eines ambitionierten Klimaschutzszenarios sind gewaltig. Ein solcher Strukturwandel hat nur Aussicht auf Erfolg, wenn sich die internationale Staatengemeinschaft zu einem gemeinsamen raschen und wirksamen Handeln entschließt.

Die Potenziale dazu sind vorhanden. Das technische Potenzial der erneuerbaren Energien übersteigt selbst bei strengen Restriktionen ein Vielfaches des derzeitigen weltweiten Energieverbrauchs (siehe S. 37). Aus struktureller Sicht ist die Herausforderung gewaltig, da die rechtzeitige Mobilisierung dieser Technologien etwa alle zehn Jahre eine Verdopplung ihres derzeitigen Beitrags verlangt und gleichzeitig die Energienutzung weltweit deutlich effizienter werden muss. Der erforderliche Umbau der globalen Energieversorgung innerhalb eines halben Jahrhunderts hat nur Aussicht auf Erfolg, wenn sich die große Mehrheit der internationalen Staatengemeinschaft zu einem gemeinsamen raschen und wirksamen Handeln entschließt.

"Nord" und "Süd" – Nutznießer einer gemeinsamen Energiestrategie

Wegen der hohen Sonneneinstrahlung haben gerade südliche Länder so hohe Potenziale an erneuerbaren Energien, dass sie selbst ihren zukünftig denkbaren Verbrauch bei Weitem übersteigen. So ließe sich etwa allein in Marokko mit Hilfe solarer Kraftwerke eine Strommenge erzeugen, die dem heutigen Weltstromverbrauch entspricht. Die Nutzung regenerativer Quellen für den nationalen Verbrauch ist also nicht die einzige Perspektive für die heutigen Entwicklungsländer. Da längerfristig über Stromleitungen oder chemische Energieträger auch ein transkontinentaler Energieaustausch technisch möglich ist – ähnlich wie dies heute mit Erdgas bereits der Fall ist – können die heutigen Entwicklungsländer in einigen Jahrzehnten "Exportregionen" für erneuerbare Energie werden.

Mit erneuerbaren Energien könnten viele Länder im Sonnengürtel zu Energielieferländern werden. Von einer solchen Energiepartnerschaft würden Nord und Süd gleichermaßen profitieren.

Energie ist nicht das einzige knappe Gut. In vielen Ländern zeichnet sich in den kommenden Jahrzehnten ein erheblicher Mangel an sauberem Wasser ab, auch für die landwirtschaftliche Nutzung. Ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Länder in den Trockengebieten der Erde ist deshalb die kombinierte Bereitstellung von Elektrizität und Trinkwasser. Dazu können solarthermische Kraftwerke in Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden. Die ausgekoppelte Wärme dient zur thermischen Meerwasserentsalzung, die Wasser mit einem für die landwirtschaftliche Bewässerung ausreichend niedrigen Salzgehalt liefert. Die Herstellung von entsalztem Wasser wäre dabei sogar vorrangiges Ziel: Strom fällt quasi als Nebenprodukt an und kann sowohl im Erzeugerland genutzt oder mittels der verlustarmen Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) nach Mitteleuropa exportiert werden. Die Übertragungskosten zum Beispiel von Marokko nach Europa liegen im Bereich weniger Cents pro Kilowattstunde, so dass in Mitteleuropa langfristig Kosten für importierten Solarstrom von unter 6 Cent/kWh erreichbar sind. Für diesen Zweck werden leistungsfähige Leitungen benötigt, wie sie bisher weltweit mit knapp 60 GW Leistung und Übertragungslängen von bis zu 2.500 km je Leitung betrieben werden.

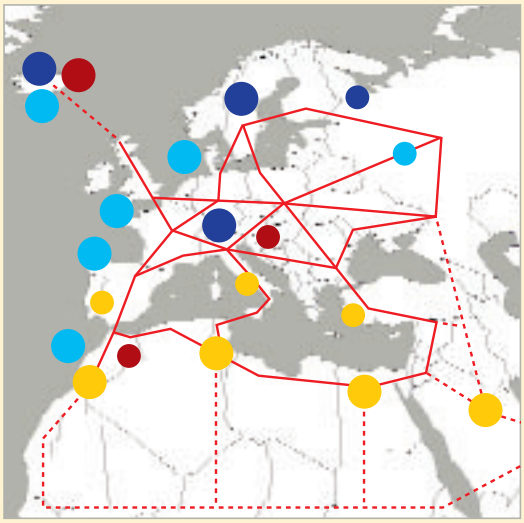
Die Bedeutung der Entwicklungsländer

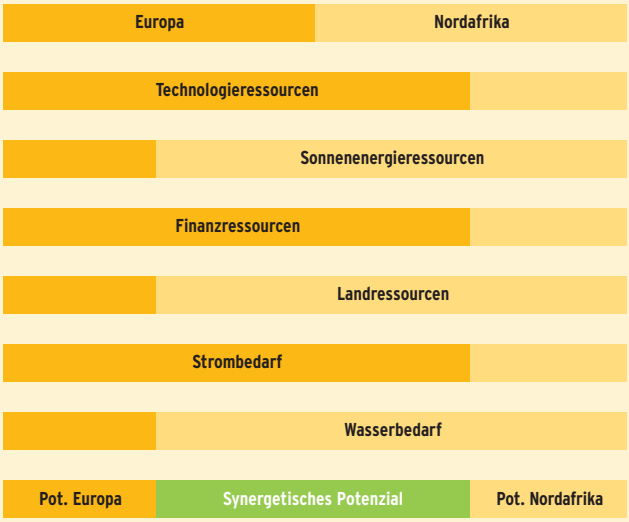
Aus der Sicht der Energieversorgung werden Entwicklungsländer gewöhnlich mit “dezentralen”, nicht oder nur wenig vernetzten Versorgungsstrukturen gleichgesetzt. Die Verbraucher dort haben also keinen Zugang zum Stromnetz und verfügen wegen ihrer geringen Einkommen kaum über fossile Energien. Dies trifft heute für knapp drei Milliarden Menschen in Entwicklungsländern und damit die Hälfte der Menschheit insgesamt zu.

Gleichzeitig befinden sich die Entwicklungsländer in einem unaufhaltsamen Urbanisierungsprozess. Bereits in 15 Jahren wird die Hälfte ihrer Bevölkerung (2015 insgesamt sechs Milliarden Menschen) in Städten wohnen, die oftmals deutlich größer sind als in der nördlichen Hemisphäre. Von den derzeit 15 Städten mit mehr als zehn Millionen Einwohnern liegen elf Städte mit zusammen 140 Millionen Einwohnern in Entwicklungsländern. Mexico City, Sao Paulo und Bombay sind dabei die größten. Im Jahr 2010 werden bereits mehr als 20 Städte dieser Größe mit dann 350 Millionen Menschen in den Entwicklungsländern zu finden sein. Eine weitere Milliarde

→ Synergetische Potenziale

Quelle: DLR





Solarthermische Stromerzeugung, Wasserentsalzung
Geothermie
Windkraft
HGÜ-Verbundnetz
Wasserkraft
erweitertes Verbundnetz

Synergetische Potenziale Europas und Nordafrikas zur gemeinsamen nachhaltigen Entwicklung einer Energieversorgung. Mittels eines transkontinentalen Stromverbunds zur gemeinsamen Nutzung der ergiebigsten erneuerbaren Energiequellen dieser Region können diese Potenziale erschlossen werden.

→ Ländliche Energieversorgung in Entwicklungsländern mit erneuerbaren Energien

Rund zwei Milliarden Menschen verfügen nicht über eine Stromversorgung aus Stromnetzen. Dort ist auch der Verbrauch nichtkommerzieller Energie, also Brennholz für Kochzwecke, am höchsten. Vielen Menschen in diesen Ländern gelingt ein Überleben nur dank des zeitaufwendigen, körperlich anstrengenden, aber dennoch unproduktiven und ökologisch bedenklichen Sammelns von Brennholz. Gerade in diesen ländlichen Regionen von Entwicklungsländern kann der Einsatz von erneuerbaren Energien einen wichtigen Entwicklungsimpuls liefern. Unterschiedliche Technologien werden zu diesem Zweck weiterentwickelt, beispielsweise:

Verbesserte Holzherde erhöhen die Effizienz der Biomasse-Verbrennung und tragen zu einer erheblichen Verbesserung der Luftqualität im Wohnbereich bei: Vorsichtige Schätzungen gehen davon aus, dass bis zu zwei Millionen Tote pro Jahr auf die Folgen der Luftverschmutzungen in Innenräumen zurückzuführen sind. Es sind einfache konstruktive Änderungen, die zu der Verbesserung der Herde führen: Wärmeisolierte Behälter um die Feuerroste, erhöhte Brennkammern und optimierte Luftführung sorgen für eine möglichst vollständige Verbrennung. Durch die hohe Effizienz der Holznutzung muss wesentlich weniger Brennholz gesammelt werden – die Bevölkerung spart Zeit für andere Tätigkeiten, die Holzvorräte werden geschont.

Einfache Biogasanlagen nutzen die Rückstände der Landwirtschaft, Fäkalien oder Tierdung, um ein brennbares Gas für Koch- und Beleuchtungszwecke zu erzeugen. Ballons aus Kunststoffplanen, einfach konstruierte Betontanks oder Metalltonnen wurden in China und Indien bereits in großen Stückzahlen eingesetzt. Insgesamt sind rund 25 Millionen solcher kleinen Biogasanlagen in Betrieb.

Solarkocher bündeln die Solarstrahlung und sind zum Kochen, aber auch für gewerbliche Zwecke geeignet. **Windbetriebene mechanische Wasserpumpen** verbessern die Wasserversorgung in Argentinien, aber auch in vielen afrikanischen Ländern.

Mit "**Solar Home Systems**" oder größeren photovoltaischen Anlagen können einzelne Hütten, aber auch Dörfer mit Elektrizität versorgt werden. In dörflichen Stromnetzen (sogenannten **Mini Grids**) werden die Solarmodule mit Batteriespeichern und ggf. kleinen Windenergieanlagen und Dieselaggregaten gekoppelt. Die **ländliche Elektrifizierung** ist ein wichtiger Entwicklungsbeitrag: Der Betrieb von gewerblichen Anlagen (Mühlen, Kühlanlagen etc.) erhöht die Wirtschaftskraft, Kommunikationsmittel und Beleuchtung ermöglichen neue Bildungschancen, der Anschluss von Krankenstationen an eine Stromversorgung erlaubt die Kühlung von Medikamenten und die Aufbereitung von Trinkwasser.

Menschen wird in Städten mit mehr als einer Million Einwohnern leben.

Diese Entwicklung ist für die zukünftige Energieversorgung in diesen Ländern von großer Bedeutung. Sie stehen vor einer weit größeren Herausforderung als die Industrieländer, wenn es um die Annäherung an eine nachhaltige Energieversorgung geht. Diese Länder müssen nämlich gleichermaßen für beide Bereiche – stark wachsende Ballungsräume und ländliche Regionen – nachhaltige Lösungsansätze finden. Für die erneuerbaren Energien gibt es hier zwar ein reiches Potenzial, es kann aber nur mit technischer und vor allem finanzieller Hilfe der Industrieländer erschlossen werden. Auch Effizienzsteigerungen bei der Erzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung im industriellen und gewerblichen Bereich, hocheffiziente Gas-Kraftwerke) und erst recht bei der Nutzung von Energie sind von enormer Bedeutung; ebenso eine Erneuerung und Verbesserung der bestehenden Infrastruktur.

In den ländlichen Gebieten weniger entwickelter Länder sind bereits heute die "vor Ort" befindlichen erneuerbaren Energien die einzig sinnvolle Versorgungsmöglichkeit, da schlechte Verkehrsinfrastrukturen die ohnehin

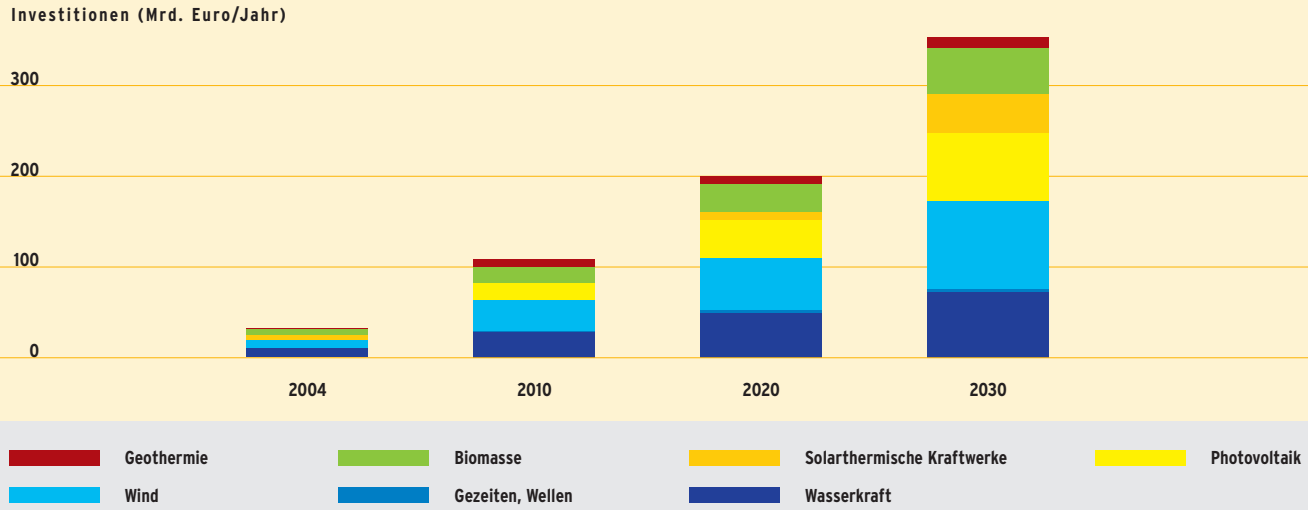
Die globalen Herausforderungen der Energieversorgung für die nächsten Jahre und Jahrzehnte können nur in einer gemeinsamen Anstrengung bewältigt werden. Die Erschließung erneuerbarer Energien ist dafür ein Schlüsselfaktor.

knappen fossilen Energieträger noch mehr verteuern. Es gilt daher, mit angepassten dezentralen Technologien wie der Kleinwasserkraft, Photovoltaik, Windenergie sowie effizienter Biogas- und Biomassenutzung möglichst rasch die Grundbedürfnisse nach Energie für die Landbevölkerung auf der Basis erneuerbarer Energien sicherzustellen. Damit könnte möglicherweise auch der Urbanisierungstrend verlangsamt werden.

Der Realisierung einer solchen Strategie stehen derzeit jedoch zahlreiche Hemmnisse gegenüber. Von besonderer Bedeutung sind die fehlenden Investitionsmittel für

→ Szenario der weltweiten Investitionsvolumina

Quelle: ZSW, DLR



Szenario der Investitionsvolumina in erneuerbare Energien im Strommarkt weltweit bis zum Jahr 2030

Solarkocher in Indien

erneuerbare Energiesysteme. Daher werden bereits unterschiedliche Finanzierungsmechanismen ausprobiert: Kleine Solarsysteme können von Firmen vorfinanziert und dann durch Eingabe eines Passwortes freigeschaltet werden, das man gegen monatliche Bezahlung erhält.

Doch damit ist es bei weitem nicht getan. Teil einer Entwicklungsstrategie im Energiebereich müssen auch große, zentrale erneuerbare Energieanlagen sein. Also größere netzgekoppelte Windparks, Wasserkraftwerke in angemessener Größe und solarthermische Kraftwerke, welche die bestehenden und sich rasch ausdehnenden städtischen Regionen in ausreichendem Maß versorgen. Dabei muss auch eine erneuerbare Energieversorgung auf die jeweiligen Bedürfnisse ausgerichtet sein und wird zumeist aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Anlagen bestehen.

Im Sinne der internationalen Arbeitsteilung, aber auch der entwicklungspolitischen Ziele der Bundesregierung ist der globale Ausbau erneuerbarer Energien so zu gestalten, dass alle Beteiligten profitieren. Gleichzeitig resultieren aus dem internationalen Wachstumsmarkt erneuerbarer Energien attraktive Chancen für die deutsche Wirtschaft. Was dies bedeutet, lässt sich gut für die Stromerzeugung zeigen. Die Investitionen in Wasserkraftwerke, Windenergieanlagen, Biomassekraftwerke, solare und geothermische Anlagen dürften sich derzeit in der Größenordnung von 30 Mrd. Euro pro Jahr weltweit bewegen. Etwa ein Sechstel davon entfällt auf Deutschland. Für die Zukunft ist davon auszugehen, dass in Deutschland weiterhin jährlich etwa 5 Mrd. Euro investiert werden, um die Ausbauziele im Stromsektor zu erreichen. Gleichzeitig wird der internationale Markt stark wachsen. Durchaus vorstellbar ist, dass bereits im Jahr 2020 international ein Volumen von 200 Mrd. Euro erreicht wird. Dies bedeutet einerseits, dass der Anteil des deutschen Marktes relativ zurückgeht, andererseits aber, dass die Exportchancen enorm sind.

Ein erfolgreicher Export ist jedoch kein Selbstläufer, denn der internationale Wettbewerb wird zunehmen. Die Vorleistungen, die in Deutschland bei Forschung und Entwicklung erbracht wurden sowie die Erfahrungen bei der Markteinführung und -erschließung haben der Branche allerdings eine hervorragende Ausgangslage verschafft. Dass Deutschland für die Unternehmen auch weiterhin ein attraktiver Standort bleibt, bestätigt eine breit angelegte Befragung aus dem Jahr 2005.

Infos
Das Leitszenario des BMU: Download unter www.erneuerbare-energien.de
World Energy Outlook: www.iea.org
Internationales Politiknetzwerk für erneuerbare Energien: www.ren21.net

NEUE VERSORGUNGSSTRUKTUREN

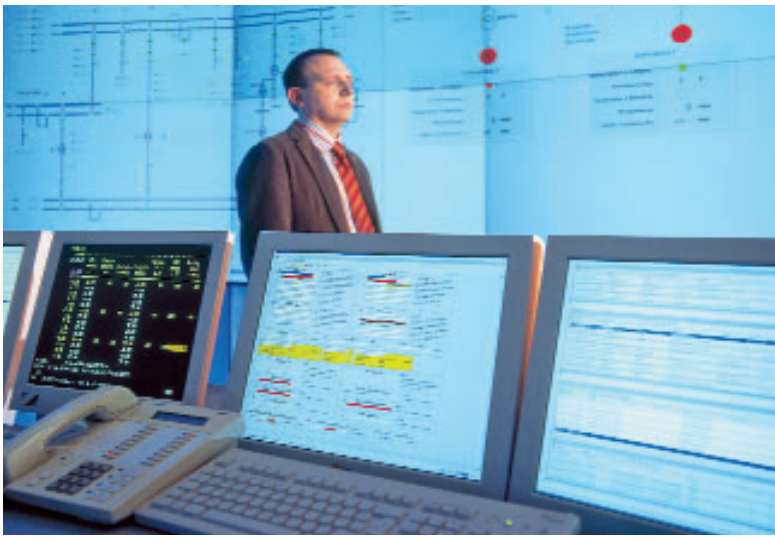
In den vergangenen Jahren hat sich die Struktur unserer Energieversorgung rapide verändert. Der Anteil erneuerbarer Energieträger in Deutschland ist innerhalb weniger Jahre auf 15 % in der Stromerzeugung gestiegen (siehe S. 29). Flexiblere, hocheffiziente Gaskraftwerke haben an Bedeutung gewonnen. Kleine Blockheizkraftwerke zur gleichzeitigen Strom- und Wärmeversorgung kommen auf den Markt. Durch die Liberalisierung des Strommarktes und die Einführung einer Strombörse wird mehr Strom frei gehandelt. Und nun kommt der heutige Kraftwerkspark in die Jahre und muss modernisiert werden. Dieser Umstrukturierungsprozess wird weitergehen, da sich der Ausbau erneuerbarer Energien fortsetzt. Unsere Erzeugungsstruktur ist damit dezentraler geworden.

Fragen der Integration erneuerbarer Energien in das Stromnetz werden zukünftig immer wichtiger werden. Zwar produzieren Windparks und Solarzellen bei Windflaute oder nächtlicher Dunkelheit keinen Strom und auch die Betriebsstunden kleiner Blockheizkraftwerke orientieren sich am Wärmebedarf der Betreiber und nicht an den Erfordernissen des Strommarktes. Aber die erneuerbaren Energieträger gleichen sich teilweise bereits untereinander aus: Selbst wenn an einem Standort Windstille herrscht, erzeugt der Verbund der deutschen Windräder immer noch Strom. Außerdem ist die Windstromerzeugung mittlerweile gut vorhersagbar. Holz, Gülle und andere Biomasse sowie die Wärme der Erde können zudem rund um die Uhr verstromt werden. Im Fachjargon heißt dies: bedarfsgerechte Erzeugung.

In Deutschland ermöglicht das elektrische Verbundnetz infolge der zahlreichen angeschlossenen Erzeuger, Verbraucher und Speicher bereits einen gewissen Ausgleich von Leistungsüberschüssen und -defiziten. Wenn die erzeugte elektrische Leistung und der Verbrauch dennoch nicht übereinstimmen, muss die Diskrepanz ausgeglichen werden. Diese “Lücke” entsteht nicht nur durch erneuerbare Energien. Störfälle konventioneller Kraftwerke, revisionsbedingte Abschaltungen und die Schwankungen in der Stromnachfrage – das sprichwörtliche gleichzeitige Anschalten der Kaffeemaschinen morgens um halb sieben – tragen genauso dazu bei. Zum Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch sind Regelkraftwerke erforderlich. Heute werden dazu neben Speicherwasserkraftwerken auch gedrosselte Dampf- und Gaskraftwerke verwendet.

Systemintegration erneuerbarer Energien

Dem Ausbau der erneuerbaren Energien muss sich das Energiesystem anpassen. Ein solcher Anpassungsprozess war übrigens auch in den 1970er und 80er Jahren erforderlich, als die meisten Atomkraftwerke errichtet wurden. Damals wurden in erheblichem Umfang neue Höchstspannungsleitungen verlegt, Nachtspeicher-Heizungen vermarktet und große elektrische Warmwasserboiler installiert, um den nachts in den AKWs produzierten Strom verkaufen und verbrauchen zu können.



In der Leitwarte der Evonik Power Saar GmbH werden Kraftwerke und Großverbraucher je nach Bedarf zu- und abgeschaltet. Die Firma vermarktet dies als Regelenergie.

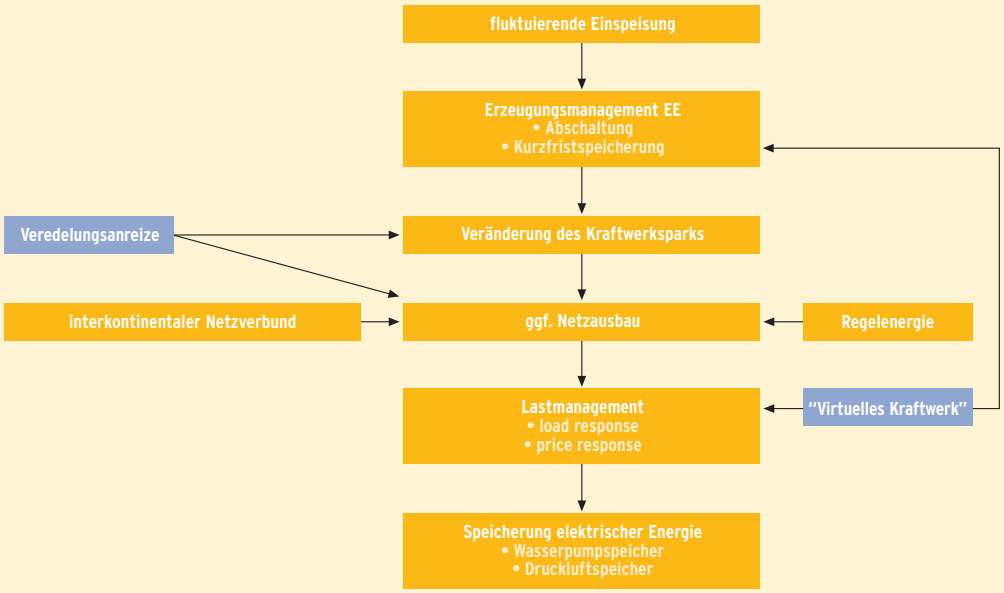
Dass eine Integration hoher Anteile dezentraler Energieträger möglich ist, zeigen Beispiele aus anderen Ländern. Die Stromerzeugung Dänemarks beispielsweise ist gekennzeichnet durch die höchsten prozentualen Anteile an Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Windenergie in Europa. Durch eine konsequente politische Forcierung des Ausbaus der KWK werden heute 50 % des Stromes und 80 % der Fernwärme durch KWK bereitgestellt. Der Beitrag des Windstromes an der Gesamtstromversorgung liegt in Dänemark bei über 18 % des Strombedarfs. Unter bestimmten Bedingungen – vor allem in stürmischen Winternächten – übertrifft die Stromerzeugung aus KWK und Windenergie sogar die Nachfrage. Der für die Netzstabilität erforderliche Lastausgleich erfolgt dort sowohl durch Leistungsregelung der wenigen großen Stromerzeuger als auch durch Im- und Export nach Deutschland und Norwegen.

Wichtig ist, dass das Energiesystem insgesamt durch ein intelligentes Management auf Erzeuger- und Verbraucherseite, durch angepasste Strukturen des Kraftwerksparks und erweiterte Speichermöglichkeiten elektrischer Energie optimiert wird.

Die Anpassung des Kraftwerksparks: Während unser heutiger Kraftwerkspark noch zu einem großen Teil auf langsamer regelbaren Kohle- und Kernkraftwerken beruht, sind beispielsweise moderne Gaskraftwerke

→ Optimierte Einbindung

Quelle: IFEU



Optimierte Einbindung erneuerbarer Energien in den Kraftwerkspark

nicht nur hocheffizient, sondern zugleich auch leichter und schneller regelbar und können damit besser an den fluktuierenden Last- und Erzeugungsverlauf angepasst werden.

Nicht nur die schnelle Regelbarkeit spricht für die Kombination von Gaskraftwerken und erneuerbaren Energien. Auch die geringen Investitionskosten zeichnen diesen Kraftwerkstyp aus. Braunkohle- oder Kernkraftwerke haben bei geringen Brennstoff- und Betriebskosten vergleichsweise hohe Investitionskosten. Daher müssen sie möglichst rund um die Uhr ("Grundlastkraftwerke") operieren, um ihre Investitionskosten wieder "einzuspielen". Moderne Gaskraftwerke hingegen sind so genannte Mittel- bzw. Spitzenlastkraftwerke. Sie sind auch schon bei niedrigeren Betriebsstunden wirtschaftlich und eignen sich daher technisch und wirtschaftlich gut, die Schwankungen der erneuerbaren Energien auszugleichen.

Diese Familie in Stutensee bei Karlsruhe nimmt an einem Testversuch teil: Ihr Stromtarif, der per SMS übermittelt wird, variiert täglich – je nach Windangebot, Stromnachfrage und anderen Randbedingungen.

Lastmanagement ist die gezielte Beeinflussung der Höhe und zeitlichen Struktur der Stromnachfrage. Wenn der Strom knapp oder die Nachfrage nach Elektrizität groß sind, könnten bestimmte Großverbraucher abgeschaltet werden. Der Stromkunde wird für seine Flexibilität finanziell belohnt. Beispielsweise kann zwischen Versorger und Kunde vereinbart werden, dass Verbraucher mit Hilfe entsprechender Kontrolltechnologien abgeschaltet werden. Bei Industriekunden wird dies vielfach schon praktiziert.

Auch in Deutschland laufen erste Versuche mit zeitvariablen Tarifen. Waschen in der Nacht, automatische Kühlschränke und große Kühlhäuser, die in Zeiten hoher Nachfrage kurzzeitig ausschalten – mit solchen technischen Finessen wird die Notwendigkeit reduziert, mit Hilfe von Regelkraftwerken auf der Versorgungsseite die Fluktuationen nachzuregeln.

Es entstehen neue Geschäftsmodelle auf Basis intelligenter Stromzähler. Der Fortschritt bei den Kommunikationstechnologien vereinfacht diese Art von Lastmanagement erheblich. Beispielsweise sind in Italien bereits 30 Millionen innovative Stromzähler installiert, die über verschiedene Schnittstellen verfügen und nicht nur eine Fernablesung erlauben, sondern auch eine Fernsteuerung von Verbrauchern.

Es gibt eine Vielzahl von Strom konsumierenden Maschinen, die problemlos für einige Zeit abgeschaltet werden können, beispielsweise Kühlmaschinen, Wasserpumpen oder Metallschmelzen. Betrachtet man den gesamten deutschen Stromverbrauch, verbraucht das Land etwa 9 % des Stroms für Kühlen und Lüftung oder Klimatisierung. Diese Segmente sind in der Regel gut zeitlich verschiebbar. Weitere Potenziale bieten Umwälzpumpen in Heizungen. Diese könnten sich frequenzabhängig abschalten und somit als Sofortreserve dienen. In Haushalten sind auch die Verbrauchssegmente Waschen, Spülen und Elektro-Heizen für Lastmanagement geeignet.

Energiespeicher: Eine weitere Maßnahme zum Abgleich zwischen Stromeinspeisung und Stromnachfrage besteht in der Zwischenspeicherung elektrischer Energie. Die Speicherung kann sowohl dezentral geschehen, beispielsweise in Batterien, als auch zentral.

Bisher wurden für die Speicherung größerer Mengen elektrischer Energie vor allem Pumpspeicher-Wasserkraftwerke genutzt. Sie nutzen den Höhenunterschied zwischen ihrem oberen Speicher und dem unteren Speicher aus (siehe S. 75). Große Pumpen befördern Wasser in die Speicherseen. Später fließt das Wasser zurück und treibt dabei Stromturbinen an. Weltweit gibt es 280 dieser Pumpspeicherkraftwerke. Der Gigant unter den deutschen Anlagen, das Kraftwerk Goldisthal im Thüringischen Schiefergebirge mit über 1.000 Megawatt elektrischer Leistung, ging Ende 2003 ans Netz, vier Jahrzehnte, nachdem die ersten Planungen begonnen hatten.

Schon heute leisten Pumpspeicherkraftwerke wie Goldisthal einen wichtigen Beitrag für die Sicherheit der Stromversorgung: Sie können ihre Pumpen mit einem enormen Stromverbrauch anlaufen lassen, wenn zu viel Strom im Netz ist (oder der Strom billig ist, was meist dasselbe ist). Und sie lassen das Wasser aus den hoch gelegenen Speicherbecken wieder ab, wenn Strom knapp ist. Insgesamt geht dabei zwar etwa ein Fünftel der eingesetzten Energie verloren, für die Effizienz des gesamten Systems entsteht aber ein Vorteil, der diesen direkten Verlust mehr als ausgleicht. Und die Betreiber solcher Kraftwerke verdienen ihr Geld an dem Unterschied zwischen den Stromeinkaufs- und -verkaufspreisen. Pumpspeicherkraftwerke könnten in Zukunft noch stärker an die Erfordernisse erneuerbarer Energien angepasst werden.

Solche Kraftwerke mit großen unteren und oberen Becken brauchen allerdings fast so viel Fläche wie Stauseen und noch dazu ausreichende Höhenunterschiede. Ihr Bau ist zudem hinsichtlich der Umweltwirkungen genauestens zu untersuchen und benötigt eine lange Vorlaufzeit. Das Potenzial eines Ausbaus dieser eleganten Speichertechnologie in Deutschland ist daher sehr begrenzt.

Langfristig erscheinen die noch in der Entwicklung befindlichen Druckluftspeicherkraftwerke eine interessante Alternative zu bieten. In diesen Kraftwerken wird Luft mit einem elektrisch angetriebenen Verdichter komprimiert und mit bis zu 70 bar in tiefe Salzstöcke 600 Meter unter der Erdoberfläche gepresst. In Spitzenzeiten, wenn der Strombedarf groß ist, strömt diese Luft aus den Kavernen zurück und treibt eine Turbine an. CAES, Compressed Air Energy Storage, lautet der englische Fachterminus dieser Art der Stromspeicherung.

Während die heutigen Druckluftspeicherkraftwerke fossile Zusatzenergie benötigen, um eine Vereisung der

→ Kühlen, wenn der Wind weht

Kühlung hoch drehen, wenn der Wind weht. Und möglichst sparsam mit dem Strom umgehen, solange man auf das Kohlekraftwerk angewiesen ist. Dann kommt man als Kühlhaus-Besitzer mit seinem virtuellen Kohleberg auf www.etelligence.de noch mindestens 60 Jahre aus. Andernfalls ist nach 30 Jahren Schluss.

Dieses nette und lehrreiche Spiel hat der regionale Stromversorger EWE ins Netz gestellt. Es hat einen seriösen Hintergrund: An der Nordseeküste stehen schon heute jede Menge Windräder. In Zukunft kommen noch die Anlagen auf hoher See dazu. Doch was passiert, wenn der Wind kräftig bläst und die Maschinen mehr Strom produzieren als die Küstenbewohner wirklich brauchen? Bisher fließt die Energie dann über die großen Energieautobahnen Richtung Ruhrgebiet. Das ist auch mit Leitungsverlusten verbunden. Darum versuchen Wissenschaftler, den Stromverbrauch in der Nähe der Küste in Zeiten zu verschieben, in denen die Windenergie viel Strom liefert. Kühlhäuser und andere Großverbraucher sollen helfen, den Stromverbrauch zu optimieren.

In Bremerhaven machen bereits zwei große Kühlhäuser für Frischfisch mit. Die Kühlfirmen werden künftig ihre Hallen dann besonders stark abkühlen, wenn der Wind weht. Weht der Wind nicht, lassen sie die Temperaturen in ihren Hallen bis zu einem für das Kühlgut unbedenklichen Wert ansteigen Für die Kühlhäuser ist der Strom in den windstarken Zeiten billiger – genau wie an der Strombörse.

Im Internet: www.etelligence.de

Pumpspeicherkraftwerk Hohenwarte an der Saale

Seit dreißig Jahren erzeugt dieses Druckluft-Speicherkraftwerk in Huntorf Strom.

Turbinen bei der Dekomprimierung zu verhindern, wird ein sogenanntes “adiabates” Kraftwerk entwickelt, das vollkommen ohne fossile Befeuerung auskommt. Dazu wird die Wärme der verdichteten Luft in einem gigantischen Wärmespeicher zwischengelagert. Ein solches Kraftwerk kommt auf einen Speicherwirkungsgrad von 70 %.

Auch die **Prognose** der erneuerbaren Stromerzeugung verbessert sich kontinuierlich. Regelenergie ist besonders teuer, weil sie unvorhergesehen und kurzfristig bezogen werden muss. Prognoseverfahren für die Windstromerzeugung haben sich in den vergangenen Jahren bereits erheblich verbessert und werden immer weiter entwickelt. Der spezifische Bedarf an Regelenergie wird daher künftig abnehmen.

Erzeugungsmanagement: Nicht nur Verbraucher können in die Optimierung einbezogen werden. Auch die erneuerbaren Stromerzeuger können mit moderner Kommunikationstechnologie in die Kraftwerkseinsatzplanung integriert werden. Bei Überlastsituationen lassen sich die Rotorblätter von Windrädern sehr schnell aus dem Wind drehen und damit ganze Windparks bei Bedarf vom Netz schalten. Dabei muss vertraglich sichergestellt sein, dass dies nur unter bestimmten Bedingungen und für eine begrenzte Zeit geschieht. Denn in diesen Zeiten wird kein Windstrom erzeugt – wertvolle erneuerbare Elektrizität geht verloren. Zunächst sollten daher Biomasse-Anlagen zur Regelung herangezogen werden, die bedarfsgerecht steuerbar sind. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird zukünftig stärker integriert erfolgen. So lassen sich Biomasse- und teilweise auch Wasserkraftwerke nach den Bedürfnissen des Strommarktes steuern. Und mit dem speicherbaren Biogas steht ein Energieträger zur Verfügung, der im Prinzip genauso flexibel ist wie Erdgas.

Langfristig werden **weitere Maßnahmen** das Gesamtenergiesystem verbessern. Mit einer Umstrukturierung des Regelenergiemarktes könnte eine deutschlandweite Koordinierung zur Nutzung der Ausgleichseffekte in den derzeit vier verschiedenen Regelzonen zu einer Senkung des Regelenergiebedarfs führen. Auch ein Stromtransfer über die deutschen Grenzen hinweg wird die Ausgleichseffekte zwischen Nord und Süd, West und Ost erhöhen. Der Import von Solarstrom aus südlichen Ländern würde die Gleichmäßigkeit der erneuerbaren Stromproduktion weiter steigern (siehe S. 50).

Die Bundesregierung hat bereits eine Vielzahl an Maßnahmen ergriffen und plant weitere Vorschläge, um das Energiesystem für sehr hohe Anteile erneuerbarer Energien fit zu machen (siehe Bericht “Verbesserung der Systemintegration der erneuerbaren Energien im Strombereich”. Download unter: www.erneuerbare-energien.de).

Dezentrales Energiemanagement

Auf dem Weg in eine dezentralere Energieversorgung mit Blockheizkraftwerken, erneuerbaren Energien und konventionellen Kraftwerken hilft die rapide Entwicklung der Informationstechnologien. Schon heute bieten Hersteller kleiner Blockheizkraftwerke (BHKW) Internet-Schnittstellen an, die die Fernkontrolle der Systeme ermöglichen. Auch selbst lernende Systeme werden eingesetzt. Die Steuerung des BHKWs merkt sich beispielsweise, wann der Haushalt bevorzugt Strom nachfragt. Zu diesen Zeiten wird dann auch der Wärmespeicher aufgefüllt. Damit kann der kostspielige Bezug von Strom aus dem Stromnetz minimiert werden – das Stromnachfrage-Profil wird geglättet. Ein solches klug gesteuertes Kleinkraftwerk fügt sich ein in den Trend zum “smarten Haus”. Das Mini-BHKW wird zur Energiemanagement-Zentrale.

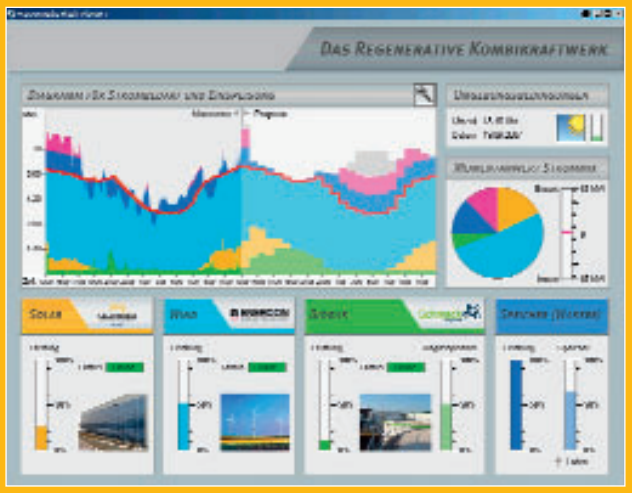
Wie die Erneuerbare-Energie-Branche zeigt, dass sie bei jedem Wetter zuverlässig Strom liefert

Kurt Rohrig beobachtet gespannt die langsam vorwärts kriechende rote Linie. Der Strich auf dem Bildschirm im Institut für solare Energieversorgungstechnik in Kassel (ISET) symbolisiert den Verbrauch von 11.740 Menschen. 5,5 Megawatt brauchen diese Leute jetzt am Vormittag. Früh um sechs lag der Verbrauch noch bei schläfrigen 3,62 MW. Am Nachmittag soll er mit 6 MW das Maximum erreichen. Der Bedarf schwankt ständig.

Rohrig, Bereichsleiter "Information und Energiewirtschaft" am ISET, sorgt dafür, dass Stromverbrauch und Stromproduktion immer dasselbe Level haben. Dazu regelt er einen **Verbund aus Erneuerbare-Energie-Anlagen**, die über ganz Deutschland verteilt sind. Ein Windpark steht kurz hinter den Nordseedeichen an der holländischen Grenze, ein Park bei Berlin, weitere Anlagen in Aachen. Die 18 Solaranlagen finden sich bei Freiberg in Sachsen, in Bayern und Baden-Württemberg. Die Biogaskraftwerke sind in Bayern, Nordrhein-Westfalen und Hessen. Und als Energiedepot fungiert ein Pumpspeicherkraftwerk, das nach den technischen Eckdaten einer Anlage in Thüringen konzipiert ist. In Kassel laufen die Steuer-Leitungen zusammen.

Gefördert wird dieser Versuch vom Bundesumweltministerium. **"Man sieht hier, dass es für die Erneuerbaren keine Grenze nach oben gibt. Wir können Deutschland zu 100 % mit erneuerbaren Energien versorgen"**, verspricht Rohrig. Wenn der Wind sehr stark weht, lässt er mit dem überschüssigen Strom die Wasserspeicher des Pumpspeicherkraftwerkes füllen. Weht der Wind nicht, schultern Solar- und Biogasanlagen die Hauptlast der Energieversorgung. Und wenn auch das nicht reicht, lässt Rohrig das Wasser in die Turbinen des Wasserkraftwerkes donnern. Die erneuerbaren Energien mögen jede für sich genommen unstet sein. Zusammen können sie ihre Schwächen jedoch kompensieren. "Wir halten fast jeden beliebigen Fahrplan ein", sagt Rohrig zufrieden.

Das **kombinierte Kraftwerk**, das vom ISET aus gesteuert wird, **ist dabei nicht vollständig autark**. Ein geringer **Im- und Export von Strom** über die Systemgrenzen hinaus ist erlaubt. Denn auch über die Grenzen Deutschlands hinweg findet ein ständiger Stromhandel statt. **In Zukunft sollen auch die Stromverbraucher helfen, die Stromschwankungen auszugleichen.** Dafür ist sogar die Integration von Elektrofahrzeugen mit ihren Speicherkapazitäten vorgesehen.



Genaue Prognosen des Stromangebots durch verlässliche Wettervorhersagen
Ausgleich von Schwankungen
Nutzung von Speichern (Pumpspeicher-kraftwerk)
7768
Genaue Prognosen des Strombedarfs
Zentrale Steuerung dezentraler Anlagen
Fahrzeuge als Verbraucher und Speicher

Das "Regenerative Kombikraftwerk" vernetzt Windenergieanlagen, Biogas- und PV-Kraftwerke zu einem Gesamtverband

Intelligentes Energiemanagement im Haushalt wird derzeit in verschiedenen Pilotprojekten erprobt. In der "Modellstadt Mannheim" ist die Steuerzentrale in der Lage, einzelne Lasten wie Kühlschrank, Wasch- oder Spülmaschine und kleine Erzeuger wie beispielsweise Blockheizkraftwerke entsprechend der aktuellen Stromnachfrage und Netzsituation ein- oder abzuschalten. Als Grundlage hierfür dient ein Preissignal, das dem Gerät den aktuellen Strompreis übermittelt. Der Preis hängt dabei in erster Linie von der im Netz zu erwartenden Strommenge ab. Ist zu viel Strom vorhanden, beispielsweise durch viel Windeinspeisung, sinkt der an der Börse gehandelte Strompreis. In einem solchen Fall werden Verbraucher im Haushalt zugeschaltet und der Kunde profitiert von den günstigen Strompreisen. Bei hohen Strompreisen werden Verbraucher abgeschaltet, stromerzeugende Einheiten dagegen speisen ein. Auch die Integration von Elektroautos mit der Nutzung der Speicherkapazitäten der Fahrzeugbatterien ist zur Bereitstellung von negativer und positiver Regelleistung denkbar und wird in zwei E-Energy-Vorhaben untersucht. Der Eigentümer von Auto oder Waschmaschine kann dabei weiterhin entscheiden, dass seine Waschmaschine nachts nicht laufen soll, oder sein Elektroauto wochentags aus dem Management herausnehmen. Bei diesem System ist das Lastmanagement für den Kunden ohne aufwendige Kommunikationssysteme möglich. Allein die Übertragung des Preissignals und die Benutzerpräferenzen tragen zur Optimierung des gesamten Systems bei. Das Gerät selbst ist klein und wird im Zählerschrank installiert.

Man kann noch einen Schritt weiter gehen: Das "virtuelle Kraftwerk" vernetzt eine Vielzahl kleiner Kraftwerke durch Datenleitungen mittels ISDN, GPRS, Mobilfunk oder Powerline so, dass die Systeme wie ein einziges Kraftwerk betrieben werden können. Virtuell – laut Oxford-Lexikon "to be in effect, but not in appearance" also etwa "wirksam, aber nicht sichtbar" sein – heißt das Kraftwerk nicht, weil es keinen echten Strom produziert, sondern weil es keine große, örtlich lokalisierbare Maschinenhalle mit Turbine und Generator mehr gibt. Mittelpunkt des virtuellen Kraftwerks ist eine Steuereinheit, die die Daten der dezentralen Kraftwerke verarbeitet und in Verbindung setzt und sie mit Prognosen zum Strombedarf, Erzeugung und Wetter vergleicht, die aktuellen Strom-Börsenkonditionen abfragt und insgesamt den Kraftwerkseinsatz klug optimiert.

Einige Stadtwerke setzen bereits heute solche Systeme ein. Sie verbinden Blockheizkraftwerke, Windkraftparks, Photovoltaikanlagen und andere Kraftwerke zu einem System. Das virtuelle Kraftwerk kann jedoch nicht nur Erzeuger vernetzen, sondern auch die Verbraucher in das Management integrieren.

Im Rahmen des Forschungsprogramms E-Energy wird die Vernetzung von zeitlich variablem Verbrauch und Erzeugung in mehreren Pilotprojekten erprobt.

Bislang sind es nur Pilotversuche, in denen ein virtuelles Kraftwerk realisiert wurde. Deshalb müssen neue Geschäftsmodelle entwickelt und kostengünstige Wege der Kommunikation gefunden werden. Das virtuelle Kraftwerk ist zwar nicht per se eine klimaschonende Technologie. Es kann aber den energiewirtschaftlichen Nutzen dezentraler und regenerativer Energiequellen erhöhen und bei ihrer Integration in das Stromnetz helfen. Das virtuelle Kraftwerk bietet somit reelle Vorteile. Es ersetzt konventionelle Kraftwerke – und nicht nur dann deren Stromproduktion, wenn der Wind gerade weht oder die Sonne scheint. Damit sind völlig neue Konstellationen denkbar: private Energiegenossenschaften, Städteverbünde, die ihre Energieversorgung gemeinsam optimieren oder Windpark-Betreiber, die ihren Strom besser vermarkten wollen.

Stromnetze der Zukunft

In dezentralen Strukturen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien müssen sich auch die Stromnetze ändern. Während heutige Netze dafür konzipiert sind, Strom aus den zentralen Kraftwerken zum Verbraucher zu bringen, wird es in Zukunft vielfältiger zugehen: Großkraftwerke speisen Strom in das Höchstspannungsnetz ein, kleine dezentrale Anlagen – Solaranlagen, Blockheizkraftwerke, Windräder – liefern ihren Strom an das Nieder- oder Mittelspannungsnetz, Steuerungen regeln den optimalen Betrieb des Systems. Um die Elektrizität von Windanlagen in Norddeutschland und von den Offshore-Anlagen in unsere Verbrauchszentren zu bringen, wird es auch einen begrenzten Neubau von Hochspannungstrassen geben müssen. Diese Leitungen stehen auch für den Stromhandel zur Verfügung.

Insbesondere der beschleunigte Netzausbau ist für die Erreichung der Energie- und Klimaziele elementar. Daher hat der Bundestag ein Gesetz erlassen, das der Beschleunigung des dringenden notwendigen Ausbaus der Stromnetze dient. Denn nur damit kann gewährleistet werden, dass Strom aus neuen, effizienten fossilen Kraftwerken und von Windenergieanlagen auf dem Meer und an Land in die Verbraucherzentren transportiert werden kann.

Kraft-Wärme-Kopplung – erneuerbare Energien effizient genutzt

Wenn ein Großkraftwerk Strom erzeugt, werden große Dampfmengen produziert und mit Turbinen in Strom umgewandelt. Bei der Umwandlung entstehen hohe Verluste. Trotz stetiger Verbesserungen hat der Mix der deutschen Großkraftwerke einen durchschnittlichen Nutzungsgrad von nur 36 Prozent. Mit anderen Worten: fast zwei Drittel der im Brennstoff vorhandenen Energie wird sinnlos in großen Kühltürmen an die Umgebungsluft abgegeben oder erwärmt die Flüsse.

Klimaschutz kommunal: Gutes Gewissen und feste Energiepreise

Die Gemeinde Trendelburg baut konsequent auf eine erneuerbare Energieversorgung.

Es gibt heute rund 100 Regionen und Kommunen in Deutschland, die ihre Energieversorgung zu **hundert Prozent aus erneuerbaren Energien** bestreiten möchten.

Ihr Ziel: **Neben ihrem Beitrag zum Klimaschutz wollen sie die Wertschöpfung bei der Energiebereitstellung in der Region steigern und neue Arbeitsplätze schaffen**. Vorreiter sind über ganz Deutschland verteilte Orte wie Trendelburg, Steinfurt, Ostritz, Freiamt, Dardesheim, Neustrelitz, Prenzlau und Neckarsulm.

Eine der Kommunen ist **Trendelburg**, ein kleines Städtchen in der Nähe von Kassel mit knapp 5.700 Einwohnern. Bei einem Gesamtstromverbrauch von rund 19 GWh hat es sich zum Ziel gemacht hat, eine 100 % Erneuerbare Energie Kommune zu werden. Sich also vollständig selber mit erneuerbaren Energien wie Wind, Solar- und Biomasseenergie zu versorgen. Und sich so auch gegen steigende Energiekosten abzusichern. “Die Bürger wachen auf. Sie fühlen sich von den hohen Energiepreisen stranguliert”, erklärt Bernhard Klug, Bürgermeister von Trendelburg. Und der Ort will noch mehr. Denn Selbstversorger ist die Stadt theoretisch schon. Zwei Biogasanlagen, vier Wasserkraftwerke, 23 Windräder und zahlreiche Photovoltaikanlagen erzeugen mittlerweile 30 GWh und damit mehr Strom, als die Stadt verbraucht.

Wenn 2011 die Konzessionsverträge auslaufen, erwägt die Stadt, die Verträge nicht zu verlängern, sondern die Niederspannungsnetze zu kaufen und selbst zu betreiben – die Wirtschaftlichkeit der Investition vorausgesetzt. Bei einem möglichen Rückkauf des ehemals kommunalen Stromnetzes vom Energieversorger geht es nicht zuerst um Erzeugung und Verkauf von Energie, sondern allein die Durchleitung von Strom. Angesichts des sich abzeichnenden demografischen Wandels könne es sich als vorteilhaft erweisen, dass die Kommune auch in energiepolitisch unabwägbaren Zeiten für eine verlässliche und sichere Stromversorgung und -verteilung zuständig ist, so die Argumentation der Stadt. Dazu könnte auch ein regionales Energieunternehmen gegründet werden.

Neben der **Stromversorgung** will der Bürgermeister auch Teile der **Wärmeversorgung** in die eigene Hand nehmen. Für die örtliche Schule, den Bauhof, das Freibad und andere Liegenschaften soll ein neues Nahwärmenetz gebaut werden.

Zur Vorbildstadt konnte Trendelburg nur werden, weil Bürgermeister, städtische Gremien und andere Initiatoren von Anfang an versucht haben, möglichst viele Bürger der Kommune auf dem Weg zur 100 % Erneuerbaren Stadt mitzunehmen. Etwa als es um den Bau der ersten Windkraftanlagen ging. Bedenken hinsichtlich einer “Verspargelung der Landschaft” wurden durch ausreichende Abstände von den Wohnhäusern und den Ausweis zweier Vorranggebiete im Regionalplan berücksichtigt, außerhalb der nun keine weiteren Windkraftanlagen mehr genehmigt werden dürfen.

Die Finanzierung für das ambitionierte Vorhaben kommt überwiegend aus der Region und bleibt in der Region.

Von den Erträgen der Solaranlage auf dem Dach des Kindergartens konnten neue Spielgeräte gekauft werden. “Damit können wir auch unseren Kleinsten spielend verständlich machen, dass sich der Einsatz für die Erneuerbaren Energien und damit den Klimaschutz lohnt”, meint Bürgermeister Klug.

http://www.kommunal-erneuerbar.de
http://www.trendelburg.de

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung macht man aus der Not eine Tugend und nutzt auch die Abwärme der Stromerzeugung, um Häuser zu heizen, Schwimmbäder zu erwärmen oder industrielle Prozesswärme bereitzustellen. Im Prinzip kann man jedes Kraftwerk in ein "Heiz-Kraftwerk" umwandeln. Besonders geeignet sind dafür aber dezentrale, kleinere Kraftwerke. Denn dann muss die Wärme nicht so weit transportiert werden. In Deutschland werden derzeit 14 % des Strombedarfs mit Kraft-Wärme-Kopplung gedeckt. In Dänemark sind es über 50 %.

Ein Großteil davon stammt aus großen Kraftwerken, die ihre Wärme an Fernwärmenetze abgeben, aus der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung und aus Dampfturbinenanlagen. Aber auch Blockheizkraftwerke – kompakte und kleinere Anlagen zur gleichzeitigen Strom- und Wärme-Versorgung – tragen dazu bei.

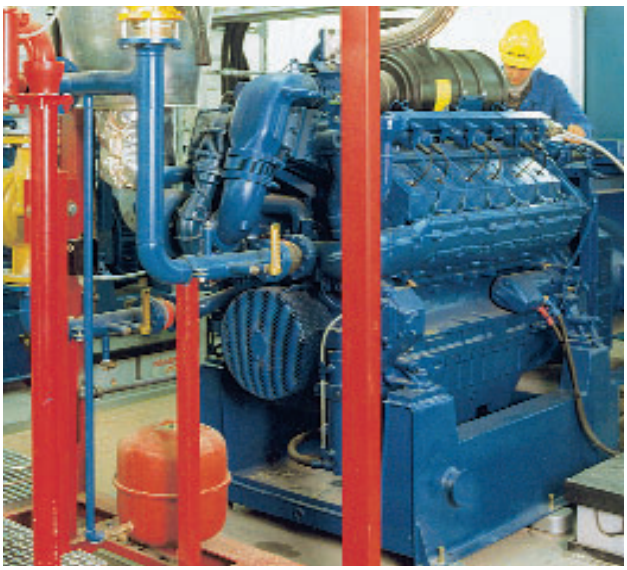
Blockheizkraftwerke (BHKWs) gibt es in allen möglichen Größenordnungen, von einem Kilowatt (Tausend Watt) bis hin zu einigen Megawatt (Millionen Watt).

Verschiedene Technologien eignen sich als Blockheizkraftwerke – Ottomotoren, Brennstoffzellen, Gasturbinen, Stirling- oder Dampfmotoren. Kommerziell verfügbar ist bislang allerdings nur der Ottomotor. Der Stirling-Motor steht als Technologie für Blockheizkraftwerke, die klein genug für ein einzelnes Haus sind, nach jahrelanger Erprobung jetzt endlich an der Schwelle zur Marktreife, während die anderen Typen noch weiter entwickelt werden müssen.

Motor-Blockheizkraftwerke, kurz Motor-BHKWs, sind nichts anderes als Otto- oder Dieselmotoren, wie wir sie vom Auto kennen. Im Ottomotor wird ein Brennstoff wie Beispiel Erdgas mit Luft gemischt und in einem Zylinder verdichtet. Diese Mischung wird dann mit einer Zündkerze zur Explosion gebracht. Die bei dieser Explosion freigesetzte Bewegungsenergie wird – anders als beim Auto – nicht genutzt, um ein Fahrzeug anzutreiben, sondern einen Stromgenerator. Die Wärme des Abgases, des Schmieröls und des Kühlkreislaufes wird mit Wärmetauschern als Heizwasser abgegeben.

Der elektrische Nutzungsgrad dieser BHKWs liegt zwischen 25 bei kleinen und 40 % bei großen BHKWs. Hinzu kommt die Nutzung der Wärme, so dass insgesamt zwischen 80 und 90 % der Energie des Brennstoffes genutzt werden. Durch diese hohen Wirkungsgrade sind BHKWs schon bei Betrieb mit Erdgas klimaschonend im Vergleich zu fossilen Kraftwerken ohne Kraft-Wärme-Kopplung. BHKWs können aber auch mit erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden, beispielsweise mit Biogas, Klär- und Deponiegas, mit Pflanzenöl oder Holzgas.

Ein kleines Blockheizkraftwerk wird im Heizungsraum aufgestellt. Größere BHKWs verwendet man nicht für ein einzelnes Haus, sondern für größere Objekte wie



Großes Motor-Blockheizkraftwerk (oben) und BHKW mit Pufferspeicher (unten)

Altenheime, Schwimmbäder oder Krankenhäuser. Oder man speist die Wärme in ein Nah- oder Fernwärmenetz ein, mit dem viele Einzelhäuser versorgt werden können.

Eintrittskarte in den Wärmemarkt: Nahwärme

Auch im Wärmemarkt sind neue Versorgungs- und Vertriebsstrukturen notwendig. Ein besonders wichtiges Beispiel für neue Wärmeversorgungsstrukturen sind Nahwärmenetze.

Sie sind eine "Eintrittskarte" für umweltverträgliche Energietechniken und können beispielsweise Holzhackschnitzelkessel, Strohheizwerke, Sonnenkollektoren mit Langzeitspeicher, Biogas-Anlagen oder Blockheizkraftwerke mit Biomasse-Vergaser untereinander sowie mit fossilen Heizungssystemen vernetzen. Nahwärmenetze sind damit sowohl der "Missing Link" zwischen zentraler

und dezentraler Energieversorgung wie auch zwischen der heute fossil basierten und einer zukünftig regenerativ gestützten Wärmeversorgung. Sie bieten nicht nur einen höheren Komfort für die Kunden, sondern vereinfachen auch die Integration erneuerbarer Energien, da

- Umwandlungstechnologien eingesetzt werden können, die aus technischen Gründen erst oder bevorzugt bei höheren Leistungen realisierbar sind, beispielsweise Vergaser oder Tiefengeothermie;
- in größeren Anlagen kostengünstigere Brennstoffe einsetzbar sind (halmgutartige Biomasse, inhomogene Brennstoffe wie Stückholz anstelle von Pellets);
- Speichertechnologien sich eher rechnen und mit ihnen am besten eine saisonale Speicherung – oder auch Langzeitspeicherung – möglich ist. Sommerwärme für winterliche Monate;
- durch die Kopplung verschiedenartiger erneuerbarer Energieträger ein Ausgleich für fluktuierende Wärmebereitstellung geschaffen werden kann, etwa durch Sonnenkollektoren mit Holz-Stützfeuerung;
- größere Aggregate eingesetzt werden können, die günstigere spezifische Investitionskosten aufweisen als kleinere. Beispielsweise liegen die Wärmekosten einer solaren Großanlage um den Faktor 4 unter denen einer Kleinanlage.

Erneuerbare Energien im Elektro-Auto

Viele Fahrzeughersteller verfolgen heute eine allmähliche Elektrifizierung des Antriebsstranges, die vor allem innerorts zu einer deutlichen Verbrauchsreduzierung führt. Die bekannten “Hybrid-Fahrzeuge” setzen dabei noch auf einen konventionellen Verbrennungsmotor als Energiequelle, teilweise kann der Elektromotor das Fahrzeug allerdings auch bereits selbständig antreiben. Die geringe Batteriekapazität ermöglicht jedoch nur kurze Strecken. Durch eine weitere Vergrößerung der Batterie bietet sich die Möglichkeit, diese über das externe Stromnetz zu laden und auch größere Strecken rein elektrisch, also mit “Strom aus der Steckdose” zurückzulegen. Solche Fahrzeuge werden derzeit unter dem Begriff “Plug-In-Hybrid” diskutiert, bei reinen Elektrofahrzeugen geht man noch einen Schritt weiter. Sie verfügen nur noch über einen elektromotorischen Antrieb mit entsprechend leistungsfähiger Batterie.

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges in Form von Plug-In-Hybriden und Elektrofahrzeugen erlaubt erstmals auf breiter Ebene die Verwendung von extern erzeugtem elektrischem Strom im Straßenverkehr. Dies bewirkt eine erhebliche Verbreiterung der Energiebasis im Straßenverkehr, die heute nahezu vollständig von fossilen Energieträgern abhängig ist. Für Elektrofahrzeuge stünde ein überall erhältlicher und quasi genormter Energieträger zur Verfügung, der zahlreiche neue Energiequellen für den Verkehrsbereich nutzbar machen kann. Hierzu gehören auch die erneuerbaren Energien wie Windkraft, Wasserkraft oder Photovoltaik. Die Umweltbilanz des Betriebs von Elektro-Pkw ist dann vor allem von der ökologischen Qualität der Stromerzeugung abhängig. Zusätzlich verringert sich die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern. Verkehrspolitisch besonders sinnvoll ist der Einsatz von Elektrofahrzeugen in Zusammenhang mit neuen Mobilitätskonzepten, beispielsweise Car sharing und öffentlicher Verkehr, oder in Fuhrparks.

In Neckarsulm versorgt ein großes Sonnenkollektorfeld ein Nahwärmenetz.

Die Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom im Straßenverkehr ist dabei in ihrer CO_2-Vermeidungswirkung durchaus vergleichbar mit dem Einsatz im Stromsektor. Klimapolitisch spricht also nichts dagegen, regenerativ erzeugten Strom in Elektroautos einzusetzen, wenn dieser aus zusätzlichen, für Elektromobilität gebauten Anlagen stammt. Zusätzlich werden durch elektrisch betriebene Fahrzeuge auch noch verschiedene lokale Umweltvorteile realisiert. Dazu gehört insbesondere der am Fahrzeug emissionsfreie und auch lärmarme Betrieb. So kann die derzeit durch Verbrennungsmotoren verursachte, hohe Luftbelastung mit Feinstaub und Stickstoffdioxid in den Innenstädten reduziert werden. Langfristig kann die Vielzahl der Batteriespeicher im Elektroauto nicht nur als Verbraucher genutzt werden, sondern auch als Speicher und Quelle für so genannte Regelleistung. Wenn die Batterien der Elektroautos Strom bei Bedarf in das Stromnetz zurück laden können, könnten die Fahrzeuge helfen, die fluktuierenden erneuerbaren Energieanlagen in die Stromversorgung besser zu integrieren. Bereits relativ wenige, netzgekoppelte Elektro-PKW können zur lokalen Verbesserung der Netz- und Spannungsqualität herangezogen werden, in dem sie bei Bedarf als Senke und als Quelle zu- oder abgeschaltet werden. Sie können auf diese Weise auch direkt zum lokalen Lastausgleich beitragen und damit die Belastung der vorgelagerten Netzebenen sowie den notwendigen Einsatz von Regelreserven reduzieren. Dies wird besonders vor dem Hintergrund steigender Anteile von erneuerbaren Energie-Anlagen im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz relevant.

Elektroautos können mit Strom aus erneuerbaren Energien betankt werden.

Sehr viele Elektro-PKW können prinzipiell zu einem virtuellen Regelkraftwerk zusammengeschaltet werden. Ein Ersatz konventioneller Regelkraftwerkskapazitäten ist also denkbar. Erforderlich für diese systemintegrativen Eigenschaften von Elektroautos ist eine Anpassung der Architektur des Verteilnetzes und eine technische Fortentwicklung der Elektrotankstellen.

Ein Blick in die Zukunft: die Wasserstoffversorgung

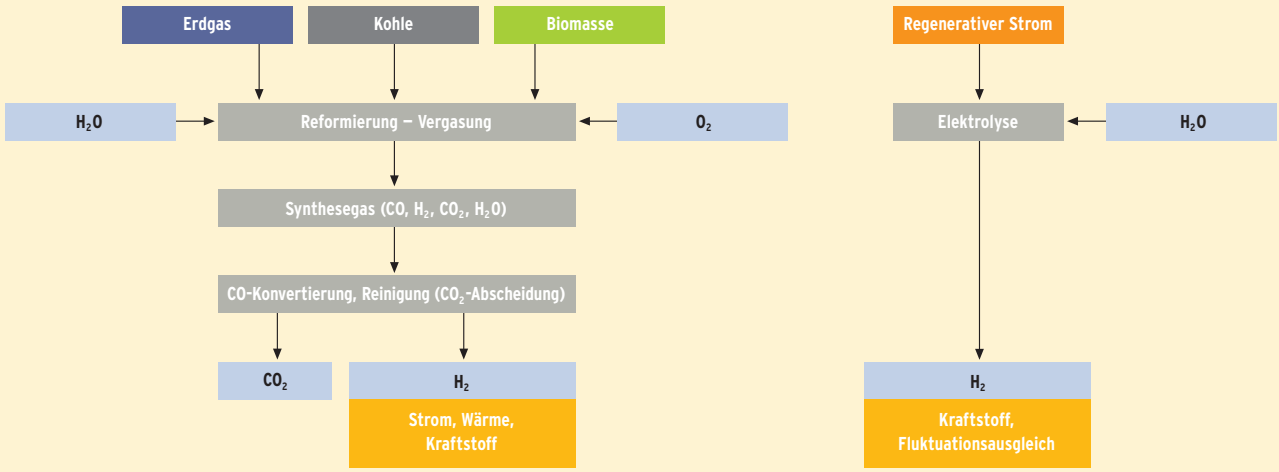
Wasserstoff aus Sonnenenergie und Wasser: Diese verlockende Vision einer ganz neuen Versorgungsinfrastruktur hat Jules Verne schon 1874 formuliert. Seit dieser Zeit sind zahlreiche Konzepte einer "Wasserstoffwirtschaft" entworfen worden, meistens auf der Basis erneuerbarer Energien. Bei vielen dieser Vorschläge entstand jedoch der Eindruck, dass Wasserstoff der zentrale Problemlöser sowohl für die Versorgungsengpässe der Energieversorgung (begrenzte fossile Vorräte) als auch für die Entsorgungsengpässe (CO_2-Emissionen und Treibhauseffekt) sei und man zahlreiche Zwischenschritte und Entwicklungsstufen einer sich ändernden Energiewirtschaft überspringen könne.

Heute wird Wasserstoff vor allen Dingen aus drei Gründen weiterentwickelt:

- Steigt der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung deutlich über 50 %, sind die heute üblichen Methoden des Last- und Erzeugungsmanagements ausgeschöpft. Es wird dann ein speicherbarer Energieträger benötigt, in den der vorhandene Strom verhältnismäßig leicht umgewandelt werden kann.
- Der Verkehrssektor ist praktisch vollständig von der knappsten fossilen Ressource, dem Mineralöl, abhängig. Benzin, Diesel und Kerosin werden von Jahr zu Jahr zunehmend nachgefragt. Neben Elektroautos wird Wasserstoff aus regenerativen Quellen als möglicher neuer Kraftstoff vorgeschlagen.
- Ein Grund für die Renaissance des Wasserstoffs ist die Brennstoffzelle: Diese innovative und effiziente Technologie wandelt Wasserstoff und Sauerstoff unter Abgabe elektrischer und thermischer Energie in Wasser um, ohne dabei alle sonstigen bei herkömmlichen Kraftstoffen und Motoren auftretenden Schadstoffe zu produzieren. Damit erscheint eine ideale Symbiose zwischen Strom und Wasserstoff möglich.

→ **Prinzipien der Wasserstofferzeugung**

Quelle: DLR



Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff aus erneuerbaren und erschöpflichen Primärenergiequellen

Mit diesem Elektrolyseur wird Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespaltet.

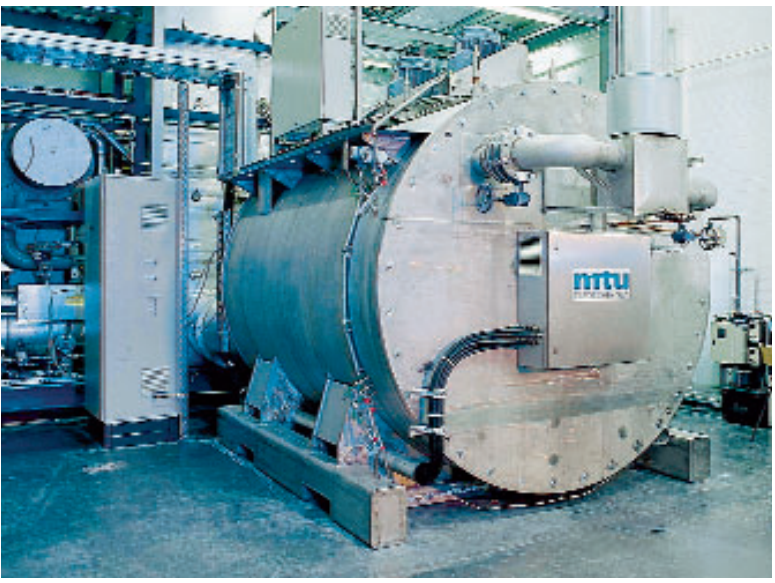
Woher soll der Wasserstoff kommen? Über die Umweltverträglichkeit entscheiden der Prozess und die Rohstoffe, aus denen Wasserstoff gewonnen wird.

Nutzen und Sinnhaftigkeit einer Wasserstoffwirtschaft hängen in erster Linie davon ab, woher der Wasserstoff kommt. Dessen kostengünstige und umweltfreundliche Herstellung ist das Schlüsselproblem. Zwar ist Wasserstoff im Universum das häufigste Element und nicht zuletzt der Brennstoff unserer Sonne. Da er jedoch sehr reaktionsfreudig ist, gibt es ihn auf der Erde nur in "reagierter", also gebundener Form: in Wasser, in Kohlehydraten, in Biomasse oder Erdgas. Wasserstoff muss also unter Einsatz von Energie zunächst abgetrennt werden. Damit ist Wasserstoff nur so sauber wie der Prozess, mit dem er hergestellt wird. Grundsätzlich werden hierbei zwei Wege unterschieden (Grafik "Prinzipien der Wasserstofferzeugung"):

- **Elektrolytische Herstellung aus Wasser**: Am einfachsten und wirkungsvollsten kann Wasserstoff durch Elektrolyse hergestellt werden. Wasser wird hier mit Strom in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Dabei entsteht in einer Elektrolysezelle unter Gleichspannung an der Kathode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff. Fortschrittliche Elektrolyseure haben heute einen Wirkungsgrad von etwa 70% (bezogen auf den Heizwert des Wasserstoffes), langfristig gesehen werden Wirkungsgrade nahe 80 % erwartet.
- **Reformierung von Erdgas, Erdöl, Kohle- oder Biogas**: Der weitaus überwiegende Teil des Wasserstoffs wird heute aus fossilen Energien hergestellt, indem Wasserdampf mit Kohlenstoff oder kohlenstoffhaltigen Energieträgern (Erdgas, Erdöl) zu Wasserstoff reduziert wird. Der Wirkungsgrad der Dampfreformierung beträgt in heutigen Anlagen – je nach Größe - zwischen 67 % und 74 % und lässt sich langfristig gesehen um weitere drei bis vier Prozentpunkte steigern. Prinzipiell kann auch Biogas oder Holzgas reformiert und in Wasserstoff verwandelt werden.

Für die Reformierung wird jedoch einerseits zusätzliche Energie benötigt, zum anderen wird zwangsläufig auch das Treibhausgas Kohlendioxid freigesetzt. Als Resultat sind die spezifischen Treibhausgas-Emissionen fossil hergestellten Wasserstoffs immer höher als die des Ausgangsprodukts. Solange also nicht besonders effiziente Energiewandler diesen Nachteil wieder wett machen – was für die erdgasversorgte Brennstoffzelle in vielen Einsatzfällen gilt – ist der Einsatz fossil erzeugten Wasserstoffs nicht sinnvoll. Bei Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien erzeugt wird, fallen dagegen nur geringe Treibhausgas-Emissionen an.

Werden die CO_2-Emissionen des aus Kohle hergestellten Wasserstoffs direkt an der Quelle abgetrennt, verflüssigt und in unterirdischen Hohlräumen gespeichert, spricht man von "CO_2-Sequestrierung". Mit einer großtechnischen Herstellung dieses "clean coal"-Wasserstoffs wird jedoch nicht vor 2025 gerechnet. Der so gewonnene Wasserstoff würde sich mit ungefähr 7 bis 8 Cent/kWh gegenüber dem heute relativ kostengünstigen Wasserstoff aus Erdgas (etwa 4 Cent/kWh) verteuern. Setzt man regenerativ erzeugten Strom für die Elektrolyse von



Diese Brennstoffzelle wird mit Erdgas betrieben. In der Anlage wird daraus Wasserstoff produziert und dann in den Zellen in Strom und Wärme umgewandelt.

Wasser ein, ist der erzeugte Wasserstoff heute noch relativ teuer. Man rechnet aber damit, dass auf Grund des billiger werdenden erneuerbaren Stroms ähnliche Kosten erreicht werden wie bei "clean coal" – Wasserstoff.

Infos zu Systemintegration

- → Forschungsprojekt E-Energy www.e-energie.info/
- → Bericht zur Systemintegration: Download unter http://www.bmu.bund.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/systemintegration_ee.pdf

Infos zu KWK, Wasserstoff und Brennstoffzellen

- → Broschüre "Kleine Kraft-Wärme-Kopplung für den Klimaschutz. Jeder kann Energie doppelt nutzen", Bestellung beim Bundesumweltministerium, www.bmu.de
- → BHKW-Infozentrum: www.bhkw-info.de
- → Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung: www.bkwk.de
- → Das Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Informationssystem HyWeb: www.hyweb.de

Infos zu Elektroautos

- → Bundesverband Solare Mobilität e.V.: www.solarmobil.net
- → Elektromobilität bei der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie: www.dgs.de

Der Wasserstoff aus erneuerbaren Energien wäre zudem nahezu unbegrenzt verfügbar. Mittel- und langfristig ist daher nur eine Wasserstoffwirtschaft auf Basis erneuerbarer Energien sinnvoll. Gelingt es allerdings, das Elektroauto mit attraktiven Reichweiten und Kosten zu realisieren, so ist zumindest der verkehrliche Einsatz von Wasserstoff unattraktiv, weil der Wirkungsgrad der Wandlungskette Strom → Wasserstoff → Strom → Kraft deutlich niedriger ist als der Wirkungsgrad des Elektroautos. Daher ist der Einsatz von Wasserstoff insbesondere in Lkws, Bussen oder Flugzeugen zu prüfen, die schwerer oder gar nicht batterieelektrisch betrieben werden können.

Wasserstoff kann zum einen in Verbrennungsmotoren, Gasturbinen oder speziellen Brennern verbrannt werden. Für die zukünftige Nutzung von Wasserstoff ist jedoch insbesondere die elektrochemische Umwandlung von Wasserstoff mit Brennstoffzellen von Bedeutung. Die Brennstoffzelle ist deshalb zum Synonym für die "Wasserstoffwirtschaft" geworden. Mit diesem Energiewandler wird die chemische Energie der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff unmittelbar, effizient und emissionsfrei in elektrische Energie und Nutzwärme umgewandelt. Prinzipiell ist sie damit – als Umkehrung der Elektrolysetechnologie – eine ideal geeignete Wandlungstechnologie in einer sich auf Wasserstoff stützenden Energiewirtschaft.

Brennstoffzellen werden nach der Art des verwendeten Elektrolyten und der Betriebstemperatur unterschieden. Die verschiedenen Brennstoffzellensysteme werden für sehr unterschiedliche Bereiche entwickelt: Membran-Brennstoffzellen für portable und stationäre Stromversorgung und für wasserstoffbetriebene Elektrofahrzeuge; dezentrale Stromerzeugungsaggregate und Kraft-Wärme-Kopplung im Bereich bis zu einigen hundert kW elektrischer Leistung und Hochtemperatur-Brennstoffzellen im MW-Bereich zur effizienten Stromerzeugung. Solange noch kein Wasserstoff zur Verfügung steht, kann auch Erdgas oder Biogas verwendet werden. Dafür müssen diese Gase zunächst zu einem wasserstoffreichen Brenngas "reformiert" werden, bevor sie in der Brennstoffzelle mit Luftsauerstoff direkt in Strom umgewandelt werden.

Brennstoffzellen sind derzeit als Pilot- und Demonstrationsanlagen und teilweise in (meist noch nicht wirtschaftlichen) Kleinserien verfügbar. Intensive Entwicklungen laufen in der Automobilindustrie, um Brennstoffzellen als emissionsfreie Antriebsaggregate in Verbindung mit Elektromotoren für Fahrzeuge serienreif zu machen. Voraussetzung ist jedoch, dass die volumen- und gewichtsbezogenen Leistungsdichten noch weiter gesteigert werden und die Herstellungskosten um etwa eine bis zwei Größenordnungen gesenkt werden können. Anzustrebende Zielwerte sind für Hausenergiesysteme mindestens 1.500 Euro/kW, für Blockheizkraftwerke 1.000 Euro/kW und für mobile Antriebe etwa 50 Euro/kW.

WINDENERGIE – STARK IM AUFWIND

Die Fakten:

- **Zwischen 2000 und 2008 hat sich die Stromerzeugung aus Windkraft mehr als verfünffacht und trägt inzwischen mit über 40 TWh zu rund 6,6 % der Stromerzeugung in Deutschland bei.**
- **Bei Ausschöpfung des Potenzials an Land und auf See kann die Windenergie perspektivisch 30 % der Bruttostromerzeugung in Deutschland decken.**
- **Der erste Windpark auf See in Deutschland "Alpha Ventus" soll 2009 ans Netz gehen.**
- **Windvorranggebiete an Land werden vor allem an der Küste inzwischen größtenteils genutzt – im Binnenland stehen weitere Flächen zur Verfügung. Besonders an Küstenstandorten wird das Repowering zukünftig eine Rolle spielen.**
- **Die Erzeugungskosten von Windstrom betragen je nach Standort zwischen 5 und 12 Cent je kWh.**

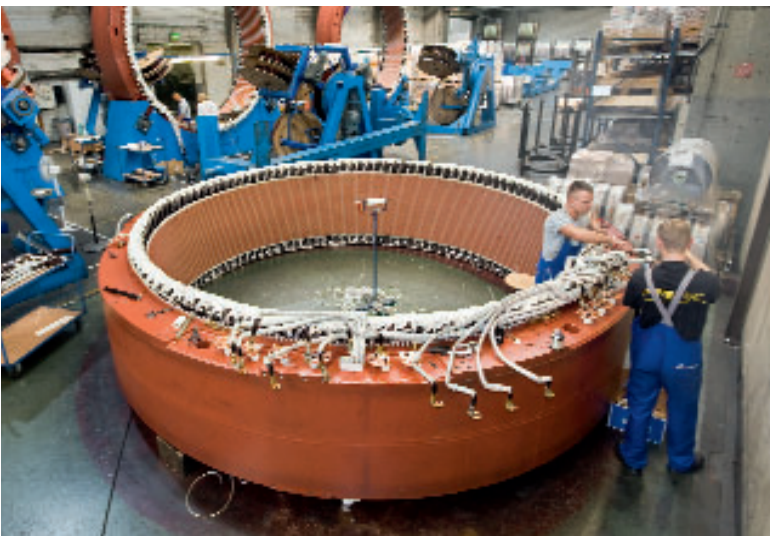
On- und Offshore-Windpark, Montage einer Windkraftanlage

Wind wird von alters her vom Menschen genutzt. Der Handel über die Weltmeere wurde vor Erfindung der Dampfmaschine ausschließlich mit Segelschiffen durchgeführt; Windräder trieben Wasserpumpen zur Be- oder Entwässerung an und Windmühlen mahlten das Korn in Europa und der ganzen Welt. Noch um 1900 standen 30.000 Windmühlen allein in Norddeutschland. Erst als Elektrizität überall in Deutschland ausreichend und billig zur Verfügung stand, verschwanden die Windmühlen aus dem Alltag.

Seit den fünfziger Jahren haben deutsche Pioniere versucht, diese klimafreundliche und ressourcenschonende Technologie wieder zu beleben. Aber erst die Ölkrisen der siebziger Jahre und das verstärkte Umweltbewusstsein seit den achtziger Jahren haben der Windenergienutzung in jüngerer Zeit zur Wiedergeburt verholfen.

Moderne Windenergieanlagen nutzen das **Auftriebsprinzip** anstatt des Widerstandsprinzips. Dem Wind wird also nicht ein Widerstand entgegengesetzt, sondern der Wind erzeugt beim Vorbeiströmen an den Flügeln einen Auftrieb, ähnlich wie beim Flugzeug. Dieser Auftrieb versetzt den Flügel in Rotation. Kann mit dem Widerstandsprinzip dem Wind maximal 12 % der Energie entzogen werden, so sind es beim Auftrieb immerhin 59 %. Im besten Fall erreichen moderne Windenergieanlagen heute schon einen Wirkungsgrad von 50 %, damit sind sie also schon sehr nahe an der maximal möglichen Energieausbeute angelangt.

Man kann in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit **vier unterschiedliche Betriebsphasen** einer Windenergieanlage unterscheiden. Weht der Wind zu schwach, so reicht die in ihm enthaltene Energie nicht aus, die Reibungs- und Trägheitsmomente der Anlage zu über-



Generatorenproduktion und ...

Stahlturmfertigung für Windkraftanlagen

winden, die Anlage steht still. Ab einer gewissen Windgeschwindigkeit – je nach Anlagentyp bei rund 3 m/s – beginnt die Anlage zu arbeiten. Dabei nimmt die Leistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit zu. Eine Verdopplung der Windgeschwindigkeit verachtfacht also die Leistung. Steigt nun die Windgeschwindigkeit weiter an, wird die maximale Nennleistung des Generators erreicht. Bei weiter wachsender Windgeschwindigkeit muss der Leistungsüberschuss weggeregelt werden. Bei modernen Anlagen werden dazu die Rotorblätter aus dem Wind gedreht. Die maximale Leistung der Anlage wird bestimmt von der durchströmten Rotorfläche und ist im Prinzip unabhängig von der Anzahl der Flügel.

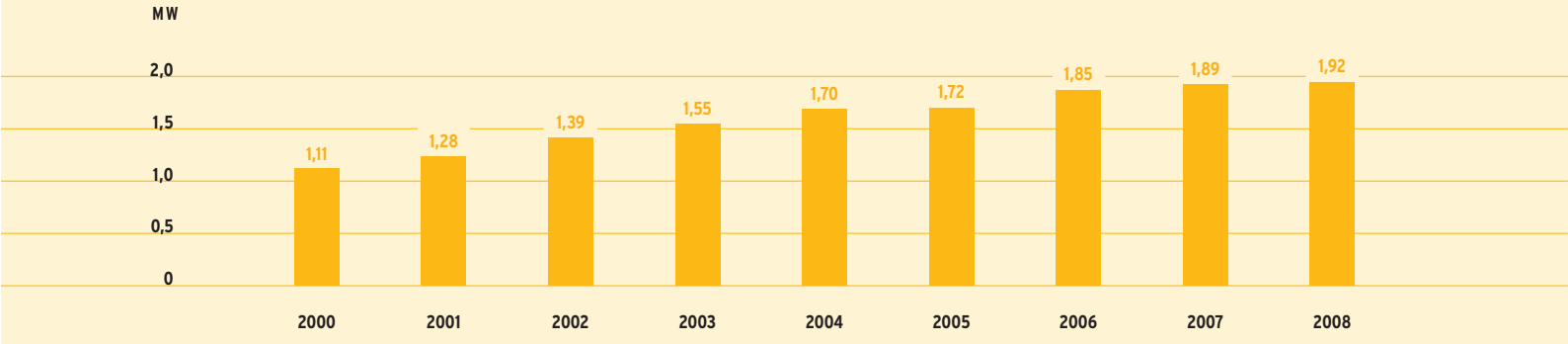
Technik der Windenergienutzung

Während in anderen Regionen der Welt die Windenergie auch zum Antrieb von Pumpen eingesetzt wird, dienen Windenergieanlagen in Deutschland heute ausschließlich der **netzgekoppelten Erzeugung von Elektrizität**. Die **technische Entwicklung** der Windenergieanlagen hat sich in den letzten 20 Jahren hauptsächlich auf die Konstruktion immer größerer Anlagen konzentriert, um so die Standorte mit guten Windverhältnissen optimal auszunutzen. Damit ist eine rasante technische Entwicklung angestoßen worden. Lag die durchschnittliche Größe der installierten Windenergieanlagen 1987 bei weniger als 50 kW, so betrug sie im ersten Halbjahr 2008 mit etwa 1,9 MW knapp das Vierzigfache (Grafik “Windenergieleistungen”). Es ist gegenwärtig noch nicht abzusehen, bei welcher Anlagengröße das technische und wirtschaftliche Optimum erreicht ist. Heute verfügen die größten Anlagen über eine Leistung von 6 MW. Der Ertrag einer solchen Anlage entspricht dem jährlichen Stromverbrauch von bis zu 5.000 Haushalten.

Der weitaus größte Teil der heute installierten Windenergieanlagen hat **drei Rotorblätter**, da so die mechanischen Belastungen am besten in den Griff zu bekommen sind. Drehende Dreiflügler werden von den meisten Menschen als optisch ausgeglichener empfunden

→ Windenergieleistungen

Quelle: DEWI



Entwicklung der durchschnittlichen Leistung neuer Windenergieanlagen

Montage einer 6 MW-Windkraftanlage

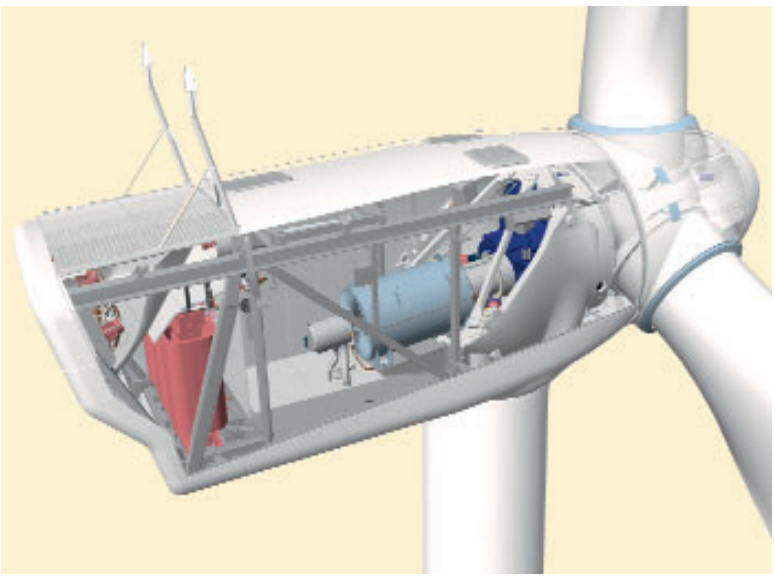
als Ein- oder Zweiflügler. Die Flügel selbst bestehen meist aus Kunststoff und sind bei großen Anlagen über 60 m lang. Die vom Rotor überstrichene Fläche beträgt bei den größten am Markt verfügbaren Anlagen inzwischen mehr als 10.000 m², das entspricht der Fläche von fast zwei Fußballfeldern.

Zur Leistungsregelung werden drei unterschiedliche Konzepte angeboten. Bei **stallgeregelten Anlagen** führen die starre Befestigung und die feste Drehzahl der Flügel zu einem Abriss der Strömung ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit. Der Rotor nimmt dann auch bei weiter wachsenden Windgeschwindigkeiten nur eine nahezu konstante Leistung auf. Der einfache Aufbau der stallgeregelten Anlagen hat zu einer weiten Verbreitung dieser Anlagen in den Anfangsjahren geführt. Bei Anlagen im Megawattbereich dominiert die aktive Blattregelung (so genannte **Pitchregelung**), bei der die Rotorblätter mechanisch um ihre Längsachse verdreht werden können. Solche Anlagen verlangen gegenüber stallgeregelten Anlagen einen höheren konstruktiven Aufwand, führen aber zu einer höheren Energieausbeute und zu einer geringeren Belastung der Rotoren. Ein Kompromiss zwischen beiden Konzepten ist die **Active-Stall-Regelung**, bei der die Rotorblätter ab ihrer Nenn- oder Maximalleistung der Windgeschwindigkeit leicht nachgeregelt werden können.

Durch die **Anpassung der Drehzahl** an die Aerodynamik des Rotors lässt sich das Windrad über einen großen Bereich der Windgeschwindigkeit mit einem optimalen Wirkungsgrad betreiben. Da vor allem für Großanlagen die Regelbarkeit und Gleichmäßigkeit der Leistungsabgabe von großer Bedeutung sind, haben die Anlagen mit variabler Drehzahl in den vergangenen Jahren deutlich zu genommen.

Bei Sturm werden die Lasten auf den Rotor zu groß. Pitchgeregelte Anlagen und Anlagen mit Active-Stall Regelung werden dann vom Netz getrennt und die Rotorblätter in Fahnenstellung gestellt, der Rotor trudelt im Leerlauf. Stallgeregelte Anlagen werden aerodynamisch mit Blattspitzenbremsen angehalten. Bei modernen Anlagen erfolgt eine langsame Abschaltung der Anlagen ab Windgeschwindigkeiten von 25 m/s, so dass beim Durchzug von Sturmfronten nur eine Drosselung der Anlagen und keine vollständige Abschaltung erfolgt.

Große Rotoren moderner Bauart drehen sich abhängig von der Nennleistung 10 bis 30 mal pro Minute. Die im Vergleich zu kleineren Windenergieanlagen geringere Drehzahl führt dazu, dass die Windräder in der Landschaft als “ruhiger” wahrgenommen werden.



Blick in die Gondel einer Windenergieanlage

Die Rotation wird über eine Welle in einem Generator in Strom umgewandelt. In vielen Anlagen ist ein Getriebe dazwischengeschaltet. Das Getriebe übersetzt die niedrigen Drehzahlen des Rotors auf die erforderliche Generatordrehzahl von 1.500 Umdrehungen pro Minute. Durch das Getriebe entstehen allerdings Verluste in der Größenordnung von 2 % je Getriebestufe, außerdem ist das **Getriebe** eine potenzielle Quelle der Geräuschentwicklung. **Getriebelose Anlagen** umgehen diese Probleme, allerdings sind hier aufwändig gefertigte und sehr große vielpolige Generatoren notwendig.

Durch die bis Mitte der neunziger Jahre dominierenden Asynchrongeneratoren wird die Drehzahl der Rotoren an die Frequenz des elektrischen Netzes “gefesselt”. Dieses System ist regeltechnisch relativ einfach und robust, erlaubt aber keine kontinuierliche Drehzahlregelung des Rotors. Durch den Einsatz eines so genannten “doppeltgespeisten Asynchrongenerators” lässt sich die Betriebsdrehzahl in Grenzen variieren. Ein Synchrongenerator erlaubt dagegen eine variable Drehzahl, da der gesamte erzeugte Strom durch einen Frequenzumrichter auf die Netzfrequenz von 50 Hz gebracht wird.

Die **Türme** der größten Windenergieanlagen sind inzwischen über 120 m hoch, so dass neue Windräder zusammen mit dem Rotor eine Höhe von bis zu 170 m erreichen. Dabei gilt: Je höher der Turm, desto weniger stören Verwirbelungen des Windes über dem Boden und desto höher sind die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten am Rotor. Diese Windgeschwindigkeiten sind sehr wichtig für die Leistung des Windrades. Bei doppelter Windgeschwindigkeit verachtfacht sich nämlich der Stromertrag.

Die Türme werden meist als Stahlmantel-Türme ausgeführt, die durch ihre schlanke Konstruktion den geringsten Einfluss auf das Landschaftsbild haben. Neben Stahltürmen kommen auch Betontürme zum Einsatz, die aufgrund ihrer Dämpfung die Schallemissionen mindern.

Vor der Küste neue Potenziale erschließen

Da aus ökonomischen und ökologischen Gründen die Standorte an Land begrenzt sind, hat man damit begonnen, die großen **Potenziale auf See** zu erschließen. Offshore – also vor der Küste – sind die Windgeschwindigkeit im Vergleich zu Standorten an Land deutlich höher und erlauben, bis zu 40 % mehr Strom zu erzeugen. Durch den Betrieb von Windparks auf See werden die Eingriffe in die Landschaft minimiert. Gleichwohl müssen potentielle negative Auswirkungen auf die Schutzgüter des Meeres untersucht werden.

Die größte wirtschaftliche Herausforderung der **Offshore-Windenergietechnik** ist es, die Zusatzkosten für den Umzug auf das offene Meer zu minimieren. Desweiteren müssen technische Schwierigkeiten, wie Meerestiefen von bis zu 40 m, starke Belastungen durch Wind und Wellen sowie ein hoher Salzgehalt der Luft beherrscht werden. Die **Seeverkabelung** und die speziellen **Gründungstechniken** machen den Windpark

Alpha Ventus: Das fertige Offshore-Umspannwerk aus der Hubschrauberperspektive

auf See teurer als an Land. Bei den kommenden Windparks in Gebieten mit moderaten Wassertiefen kommen Tragekonstruktionen zum Einsatz, die im Boden verankert werden.

Für noch größere Wassertiefen werden heute auch schwimmende Tragekonstruktionen entwickelt. Die Türme werden auf hoher See dagegen weniger hoch gebaut als bei vergleichbar leistungsstarken Anlagen an Land. Denn wegen der geringeren Verwirbelungen des Windes über der Meeresoberfläche erreicht man die für einen wirtschaftlichen und sicheren Betrieb nötigen Windgeschwindigkeiten schon in geringerer Höhe.

Die **Netzanbindung** von Offshore-Windparks hängt von der Größe des Windparks und der Entfernung zur Küste ab. Innerhalb eines Offshore-Windparks werden die einzelnen Anlagen mit einem Mittelspannungskabel miteinander verbunden – wie bei einem Windpark an Land. Bei kleinen Offshore-Windparks nahe der Küste kann die Verbindung zum Netz auch durch eine **Mittelspannungsleitung** erfolgen. Für höhere Leistungen und größere Küstenentfernungen kann eine **Hochspannungs-Drehstromanbindung** wegen der hohen Blindleistung zu technischen Problemen bei der Anbindung an das Landnetz führen. Bei Entfernungen von mehr als 50 km ist die Hochspannungsgleichstromübertragung eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Alternative zur Wechselstromverbindung.

Das “Infrastrukturplanungsbeschleunigungsgesetz”, das 2006 in Kraft trat, verpflichtet inzwischen die Betreiber der großen Stromnetze, auch die Netzanbindung der Offshoreparks zu übernehmen. Damit wird die konzentrierte und effiziente Anbindung der Parks durch wenige leistungsfähige Trassen möglich. Das vermindert auch die **Auswirkungen der Trassen auf Natur und Umwelt**.

Große Offshore-Windparks müssen als Kraftwerke im nationalen oder internationalen **Strom-Verbundnetz** betrieben werden. **Schnelle Regelbarkeit** der einzelnen Anlagen und des gesamten Parks, sehr gute **Netzverträglichkeit** und die Fähigkeit zur **Netzstabilisierung** sind essenzielle Anforderungen, die zusätzliche technische Ausstattungen bedingen.

Die optimale Auslegung eines Offshore-Windparks ist aufgrund der höheren Kosten für Gründung und Netzanbindung größer als für einen Windpark an Land. Da der erschwerte Zugang bei Störungen zu längeren Stillstandzeiten führt, muss die Zuverlässigkeit der Anlagen auf See besonders hoch sein. Systeme, die Fehler früh erkennen, und spezielle Betriebs- und Wartungsstrategien müssen eine hohe Zahl der Betriebsstunden im Jahr garantieren.

Das Potenzial für die Offshore-Windenergienutzung ist beträchtlich: Langfristig scheint es heute möglich, Windparks mit einer Leistung von bis zu 25.000 MW vor der deutschen Küste und in der weiter entfernten “Ausschließlichen Wirtschaftszone” zu errichten. Der jährliche Stromertrag wird auf 85 bis 100 TWh geschätzt und entspräche damit rund 15 % des heutigen Stromverbrauchs in Deutschland.

Die erste Offshore-Windkraftanlage im Windenergiepark Alpha Ventus

Bei der Standortwahl werden aber nicht nur wirtschaftliche und energietechnische Aspekte berücksichtigt. Die **Belange des Natur- und Umweltschutzes**, aber auch die der Schifffahrt, der wirtschaftlichen (Fischerei, Bodenschätze) und militärischen Nutzung müssen genauso abgewogen werden (siehe Abschnitt “Windenergie, Natur- und Umweltschutz”). So sind inzwischen in Zusammenarbeit verschiedener Bundesministerien die Meeresflächen identifiziert worden, die als Eignungsgebiete der Offshore-Windenergienutzung in Betracht kommen. Vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie wurden Ende 2005 erstmals **besondere Eignungsgebiete für Windenergieanlagen in Nord- und Ostsee** ausgewiesen. In einer strategischen Umweltprüfung und einer Natura 2000-Verträglichkeitsprüfung wurden unter Beteiligung zahlreicher Umwelt- und Naturschutzverbände knapp 700 km² in der Ausschließlichen Wirtschaftszone der Ost- und Nordsee als Eignungsgebiete ausgewählt.

Insgesamt wurden bisher 18 Windparkprojekte in der Nordsee und sechs Projekte in der Ostsee genehmigt.

Montagearbeiten auf der Gondel einer 2,5 MW-Anlage.

Weitere Projekte befinden sich im fortgeschrittenen Genehmigungsverfahren. Bisher sind – je nach Ausbaustufe – insgesamt 3.600 bis 6.100 MW Leistung geplant. Konservative Schätzungen gehen davon aus, dass 2011 davon etwa 1.500 MW ans Netz geschlossen werden können. Da die Auswirkungen von Offshore-Windparks auf die Meeresumwelt heute noch nicht endgültig beurteilt werden können, wurden bislang nur Pilotprojekte mit maximal 80 einzelnen Windenergieanlagen zugelassen. Der erste Offshore Windpark in Deutschland, Alpha Ventus – 45 km vor der Insel Borkum – ist seit Ende 2008 im Bau. Die ersten sechs der insgesamt zwölf geplanten 5 MW-Anlagen sollen 2009 errichtet und ans Netz geschlossen werden. Vollständig aufgestellt wird der gesamte Park mit 3.800 Volllaststunden Energie für 50.000 Haushalte aus zwölf Windrädern liefern.

Während die Offshore-Nutzung in Deutschland erst beginnt, gibt es in Dänemark, Irland, Schweden, den Niederlanden und Großbritannien bereits rund 1.100 MW an installierter Offshore-Leistung.

Die Kosten sind kontinuierlich gesunken

Die **Kosten für Windenergieanlagen an Land** sind von knapp 4000 Euro/kW Anfang der 1980er Jahre zwischenzeitlich auf 800 bis 900 Euro/kW gesunken. Die weltweit enorm gestiegene Nachfrage und steigende Rohstoffkosten bewirkten in den vergangenen Jahren jedoch ein Anziehen der Preise. Zu den reinen Kosten von Turm, Rotoren und Maschinenhaus kommen **Ausgaben für Fundament, Netzanbindung, Anfahrtswege, Grundstück und Planung** hinzu. Sie liegen bei etwa 30 % der reinen Anlagenkosten. Für die gesamten Projektkosten einer 2 MW-Anlage mit 100 m Nabenhöhe sind somit etwa 3 Millionen Euro zu veranschlagen. Da der Energieertrag einer Anlage nicht nur von der Generatorgröße, sondern vor allem von der Rotorfläche, der Nabenhöhe, der Steuerungstechnik und von aerodynamischen Faktoren abhängt, bietet es sich an, die Investitionskosten auf den erwarteten jährlichen Stromertrag zu beziehen. Seit 1990 haben sich die spezifischen Kosten je kWh Jahresenergieertrag halbiert. Unter Berücksichtigung der Betriebs- und Wartungskosten werden bei den in Deutschland typischen Jahreswindgeschwindigkeiten von durchschnittlich 5 bis 6 m/s an der Küste und 4 – 5 m/s (50 m über Grund) an guten Binnenlandstandorten, **Stromgestehungskosten** zwischen 5 und 12 Cent/kWh erreicht.

Offshore können – je nach Entfernung zur Küste und Wassertiefe – die **Zusatzinvestitionen** für die Netzanbindung und Gründung eines Offshore-Windparks bis zu 200 % des Preises der Windenergieanlagen ausmachen. So gehen erste Schätzungen davon aus, dass die in deutschen Meeren installierte Megawatt Windleistung bei 30 m Wassertiefe bis zu 3,2 Mio. Euro kosten wird. Da die Höhe der Zusatzkosten in erster Linie von der Wassertiefe und der Entfernung von der Küste und weniger von der Größe der Windenergieanlage abhängt, werden aus wirtschaftlichen Gründen möglichst große Anlagen geplant. Wegen der hohen Kosten des Netzanschlusses wird ein Offshore-Windpark sehr viel größer sein als sein Gegenstück auf dem Festland. In Deutschland werden die ersten Windparks Stromgestehungskosten zwischen 13 und 15 ct/kWh erreichen. Ähnlich wie auf dem Land wird bei einer großtechnischen Offshore-Windenergienutzung auch ein großes Kosteneinsparpotenzial erwartet. Langfristig werden darum auch die Kosten der Stromerzeugung Offshore deutlich sinken.

Natur- und Umweltschutz

Je mehr Windräder gebaut werden, desto genauer muss auch ihre Natur- und Umweltverträglichkeit hinterfragt

Die im Laufe der Lebensdauer einer Windanlage erzeugte Strommenge vermeidet die Verbrennung einer Menge Kohle in einem konventionellen Kraftwerk, die aufgeschüttet beinahe die Höhe der Windenergieanlage erreicht.

Positive Veränderung des Landschaftsbildes durch Repowering: Weniger Windräder erzeugen mehr Leistung.

werden. Dabei muss man neben einer konkreten Betrachtung der Einzelfälle und -standorte auch die Vor- und Nachteile der Windenergie abwägen. Dabei ist insbesondere auch zu berücksichtigen, welche Schädigungen der Umwelt durch die Windenergieanlage an anderen Stellen vermieden werden können.

Die Windenergie kann die Umwelt durch Geräuschemissionen, Störung der Tierwelt (hiervon betroffen sind insbesondere Vögel und Fledermäuse) und ihrer Lebensräume belasten sowie durch die Beeinträchtigung des Landschaftsbildes.

Die **Geräuschemissionen** moderner Windenergieanlagen konnten gegenüber den Anfangsjahren der Windnutzung durch aerodynamische Verbesserungen, Geräuschisolierung der Maschinengondel und den Verzicht auf bestimmte Baugruppen erheblich gemindert werden. Während direkt an der Anlage häufig Schallleistungspegel in der Größenordnung von 100 Dezibel gemessen werden, beträgt der Pegel in 50 m Entfernung nur noch 55 Dezibel, was einem Radio in Zimmerlautstärke entspricht. In 500 m Entfernung, dem Mindestabstand, den Windenergieanlagen im Allgemeinen von Wohngebieten einhalten müssen, ist eine moderne Anlage praktisch nicht mehr zu hören. Häufig ist auch das natürliche Rauschen des Windes lauter als die Anlagengeräusche. Generell gelten die strengen immissionsschutzrechtlichen Anforderungen der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm).

Langjährige Beobachtungen haben gezeigt, dass **Vögel** im Flug tagsüber Windenergieanlagen ausweichen, allerdings vereinzelte Greifvogelarten (z. B. Rotmilan, Seeadler) je nach Standort in die Rotoren oder vor die Türme fliegen. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass Zugvögel in Nächten und bei Nebel auch gegen Windenergieanlagen prallen. Drehende Rotoren werden von Vögeln durch die Änderung von Luftströmungen vor den Anlagen in der Regel erkannt und können so auch bei schlechter Sicht umflogen werden. Dennoch sind einzelne Vogel- und Fledermausarten – vor allem der Rotmilan oder der Große Abendsegler – besonders vom Schlag an Windenergieanlagen betroffen. Anlagen sollten daher weder in den Hauptzugrouten von Vögeln noch in Vogelschutzgebieten aufgestellt werden. Da für die Errichtung einer Windenergieanlage immer eine Baugenehmigung einzuholen ist, werden diese Belange jeweils geprüft. Seit 2001 ist für Windparks ab drei Anlagen auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) gesetzlich vorgeschrieben.

Der Einfluss von Windenergieanlagen auf das **Landschaftsbild** wird subjektiv unterschiedlich bewertet. Sehen die einen darin eine negative Veränderung der Landschaft, so verbinden andere mit ihrem Anblick eine positive Neuausrichtung der Energiepolitik und fühlen sich nicht gestört. Der Konflikt um die unterschiedlichen subjektiven Wahrnehmungen lässt sich letztlich nicht auflösen. Aus naturschutzfachlicher Sicht ist das Landschaftsbild jedoch nicht ausschließlich eine Frage subjektiver Wahrnehmung, sondern auch die Beschreibung eines Gesamtkontextes eines bestimmten Lebensraumes. Insofern spielen auch Argumente des Landschaftsbildes eine Rolle bei der Standortwahl. Neben den standortspezifischen Abwägungen müssen auch die ökologischen Vorteile der Windkraft betrachtet werden. So können durch eine Windenergieanlage mit einer Leistung von 1,5 MW im Laufe ihrer Lebensdauer von 20 Jahren rund 64.000 t CO_2-Emissionen vermieden werden. Auch der Beitrag zum Ressourcenschutz ist beachtlich: Eine einzelne 1,5 MW-Windenergieanlage vermeidet den Einsatz von über 80.000 t Braunkohle in konventionellen Kraftwerken. Aufgeschüttet bildet diese Menge Braunkohle einen Hügel, dessen Höhe mit der Höhe der Windenergieanlage vergleichbar ist. Es ist daher eine Aufgabe der Raumplanung der Bundesländer, unter Beachtung der lokalen Gegebenheiten, in Abwägung der verschiedenen Aspekte des Umwelt- und Naturschutzes und unter Berücksichtigung der Optimierungs-

möglichkeiten Vorrang- und Eignungsflächen auszuweisen, die für die Nutzung der Windenergie zur Verfügung stehen und auch Gebiete festzulegen, die für die Windkraft nicht in Frage kommen.

Auch wenn Offshore-Windparks zukünftig außer Sichtweite Strom erzeugen und damit Eingriffe in das Landschaftsbild minimiert werden, bleibt ihr Betrieb mit Auswirkungen auf die Natur verbunden, die sich durch technische Maßnahmen nicht vollständig vermeiden lassen (siehe Abschnitt "Vor der Küste neue Potenziale erschließen"). Durch die Inanspruchnahme großer Meeresflächen steigt beispielsweise die Kollisionsgefahr für Schweinswale. Mögliche Beeinträchtigungen des Vogelzugs Richtung Winterquartier und zurück sind nicht auszuschließen und werden im Rahmen der ökologischen Begleitforschung untersucht.

Das an den ersten Offshore-Pilotanlagen durchgeführte ökologische Mess- und Kontrollprogramm wird helfen, den Einfluss auf den Vogelflug oder die Auswirkungen niederfrequenter Lärmemissionen auf die Meeresfauna besser zu verstehen. Unter Beteiligung des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) und vieler Umwelt- und Naturschutzverbände sind inzwischen die ersten besonderen Eignungsgebiete für Windenergieanlagen in der Nord- und Ostsee ausgewiesen worden. Flächen innerhalb von "Important Bird Areas" sind für die Errichtung von Windparks grundsätzlich nicht geeignet. Auch in Gebieten, die den Status eines faktischen Vogelschutzgebietes erfüllen, ist die Errichtung von Windenergieanlagen ausgeschlossen. Dennoch bleibt es auch weiterhin eine wichtige Aufgabe, die berechtigten Interessen des Klimaschutzes mit denen des Meeresnaturschutzes zu vereinbaren.

Windenergie in Deutschland

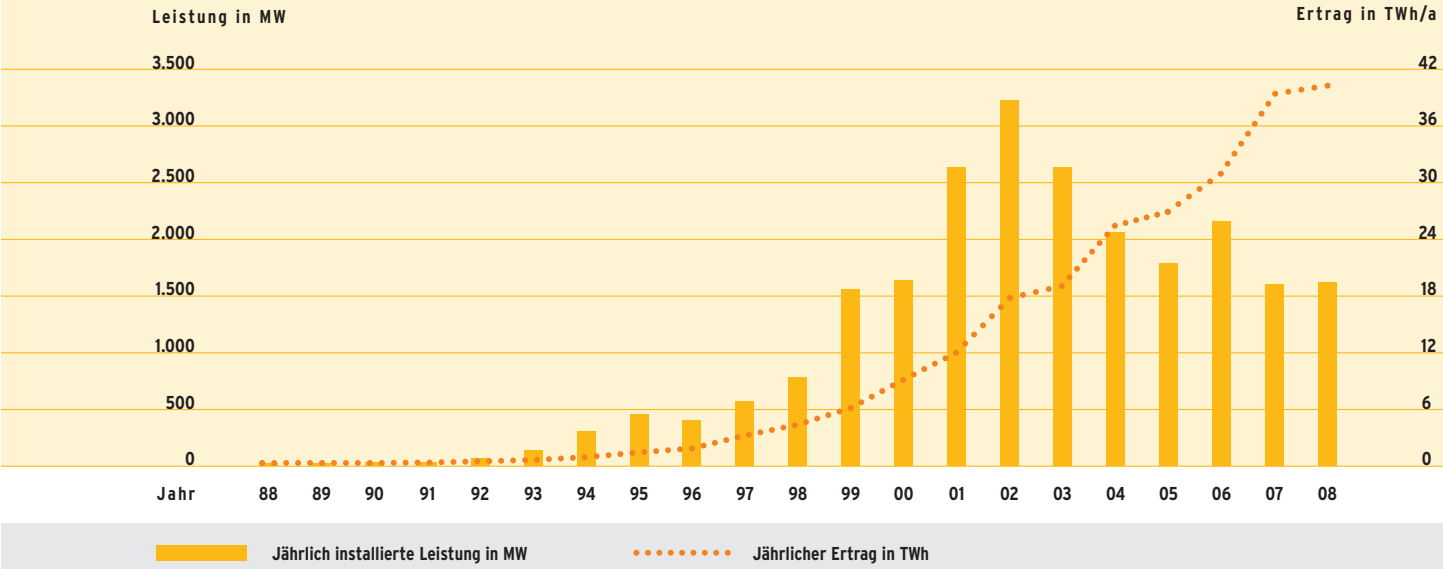
Die in Deutschland installierte Windenergieleistung wächst seit Jahren beträchtlich. Insgesamt wuchs die Zahl der Windenergieanlagen bis Ende 2008 auf 20.287 Anlagen mit einer installierten Leistung von 23.894 MW an. Mit einem Stromertrag von 40,4 TWh im Jahr trägt die Windkraft zu rund 6,6 % der Stromerzeugung in Deutschland bei, dies entspricht einer CO_2-Einsparung von etwa 32 Millionen Tonnen.

Seit 2002 verringert sich allerdings der jährliche Zubau, so dass 2008 mit 1.648 MW nur noch halb so viel Leistung ans Netz gebraucht werden konnte wie im Rekordjahr 2002. Begründet ist dieser Rückgang mit dem immer geringeren Flächenangebot für die Windenergienutzung an Land. Die von den Landkreisen ausgewiese-

Rotorblattfertigung für Windenergieanlagen in Magdeburg: Vorbereitung für den Transport zur Montagestelle

→ Windenergieleistung und Stromertrag

Quellen: ISET/BMU



Windenergie in Deutschland – eine stürmische Entwicklung

nen Eignungsgebiete sind mittlerweile bebaut. Hinzu kommen neue Abstandsempfehlungen zur Wohnbebauung sowie Höhenbegrenzungen, welche die Umsetzung neuer Anlagen erschweren. Aktuell ist zu erkennen, dass Länder und Kommunen, insbesondere in Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Brandenburg den weiteren Ausbau der Windenergie mit neuen Flächenausweisungen unterstützen. Zukünftig wird der Zubau an Windenergieleistung verstärkt durch Repowering, dem Ersatz technisch veralteter Anlagen durch moderne leistungsfähigere, getragen werden.

Obwohl die Geschwindigkeit des Windenergieausbaus seit 2003 zurückgegangen ist, stehen bisher in keinem Land der Erde mehr Windenergieanlagen als in Deutschland (siehe Grafik "Installierte Windenergieleistung"). Knapp die Hälfte der insgesamt installierten Leistung findet sich dabei in den windreichen Küstenländern. So kann Schleswig-Holstein heute schon rund ein Drittel seines Strombedarfs aus Windenergieanlagen decken.

Doch die Technikentwicklung macht die Windenergie auch im Binnenland immer attraktiver. Gerade an guten Standorten stehen heute allerdings oft noch alte Anlagen aus den 1980er und 1990er Jahren. Wenn man sie durch neue Anlagen ersetzt – das so genannte Repowering – können viele alte Windenergieanlagen durch wenige neue Windenergieanlagen ersetzt werden. Das führt auch zu einer Entlastung des Landschaftsbildes. Unter wirtschaftlichen Aspekten kommen hierfür Altanlagen mit mindestens zehn bis zwölf Betriebsjahren in Frage. Das sind vor allem die knapp 5.200 Anlagen, die bis 1997 errichtet wurden. 2006 wurden jedoch erst 79 Windenergieanlagen mit einer Leistung von rund 29 MW durch 55 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 136 MW ersetzt. Das seit 1. Januar 2009 geltende EEG gibt zusätzliche wirtschaftliche Anreize für das Repowering.

Potenziell könnten in Deutschland Windenergieanlagen an Land und auf See große Teile der Stromproduktion abdecken. Die Leitstudie 2008 (siehe S. 44) geht im Szenario "E2", in dem ein ambitionierter Ausbau von Windkraft zu Grunde gelegt wird, von 230 TWh im Jahr 2050 aus, davon 150 TWh von Windenergie auf See. Das entspricht mehr als einem Drittel der gegenwärtigen Bruttostromerzeugung.

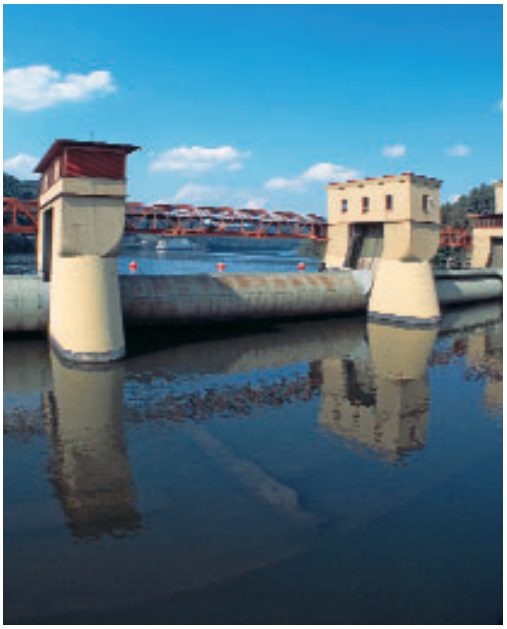
Infos zur Windenergienutzung

- → Aktuelles zur Windenergienutzung: www.erneuerbare-energien.de
- → Bundesverband WindEnergie e.V.: www.wind-energie.de
- → European Wind Energy Association: www.ewea.org
- → Deutsches Windenergie-Institut (DEWI): www.dewi.de
- → Danish Wind Industry Association www.windpower.org/en/core.htm

WASSERKRAFT – BEWÄHRT UND AKTUELL

Die Fakten:

- **Seit Jahrtausenden wird die Wasserkraft zur Energiegewinnung genutzt.**
- **In Deutschland sind 7.700 Anlagen in Betrieb und haben einen Anteil von 3,5 % an der gesamten Stromerzeugung. Weltweit beläuft sich der Anteil auf 15 %.**
- **Die Stromgestehungskosten betragen heute bei großen Anlagen 3 bis 10 Cent/kWh, bei Kleinwasserkraftwerken 10 bis 25 Cent/kWh.**
- **Mit der Förderung der Wasserkraft durch das EEG können bestehende Anlagen saniert und ausgebaut sowie an bestehenden Querbauwerken Neubauten umgesetzt werden. Voraussetzung für diese Förderung ist der Nachweis einer wesentlichen ökologischen Verbesserung bzw. eines "guten ökologischen Zustandes".**



Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal, Laufwasserkraftwerk, Kraftübertragung von der Turbine auf den Generator

Etwa ein Viertel der von der Sonne eingestrahlten Energie treibt durch Verdunstung den globalen Wasserkreislauf an. Nach dem Aufsteigen der feuchten und warmen Luft bilden sich Wolken, die über Land und Meer abregnen. Wasserkraftwerke nutzen die Bewegungs- und Lageenergie des Wassers, das ins Meer abfließt.

Wasserkraft wurde schon in vorindustrieller Zeit zum Antrieb von Mühlen, Säge- und Hammerwerken genutzt. Die Energie des Wassers wird über ein Turbinenrad in Rotationsenergie umgewandelt und zum Antrieb von Maschinen oder Generatoren genutzt. Heute wird mit Wasserkraft in Deutschland fast ausschließlich elektrischer Strom erzeugt.

Wasserkraftanlagen sind eine ausgereifte Technologie, mit der weltweit nach der traditionellen Nutzung der höchste Anteil der erneuerbaren Energie erzeugt wird. **15 % des global erzeugten Stroms stammt aus Wasserkraftwerken.** In Deutschland liegt die Wasserkraft hinter der Windenergie auf Rang zwei und stellte 2008 mit 21,3 TWh Strom 3,5 % des Stroms bereit.

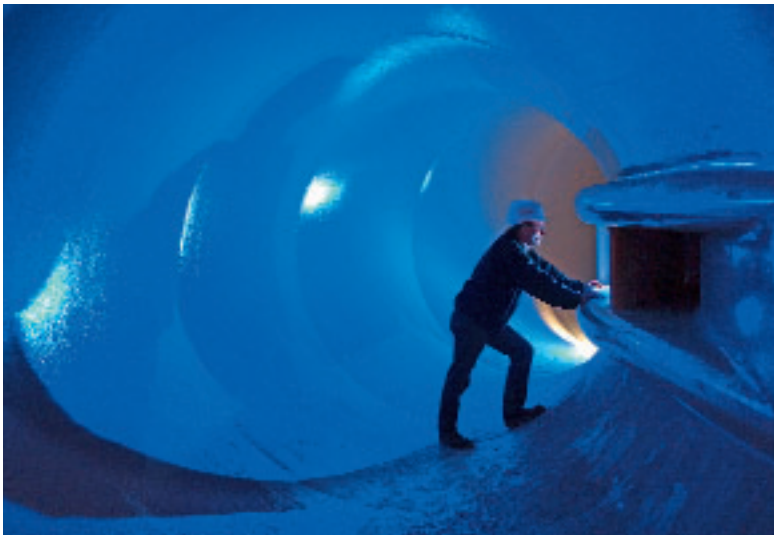
Fast 90 % des Wasserkraftstroms wird in Bayern und Baden-Württemberg erzeugt, da hier ergiebige Niederschläge und ein hohes Gefälle in den Mittelgebirgen und im Alpenvorland für günstige Verhältnisse sorgen. In Deutschland werden heute über 7.000 Kleinanlagen mit einer Leistung unter 1 MW betrieben, die sich vor allem in der Hand von kleinen Unternehmern und Privatpersonen befinden. Der Beitrag dieser Anlagen zur Stromerzeugung ist relativ gering. Mehr als 90 % des Stroms aus Wasserkraft wird in den etwa 350 Wasserkraftanlagen mit einer Leistung von mehr als 1 MW erzeugt, die in erster Linie von Energieunternehmen

betrieben werden. Insgesamt beträgt die installierte Leistung an Wasserkraftwerken in Deutschland 4.740 Megawatt.

Turbinen

Für die Nutzung der Wasserkraft gibt es unterschiedliche Turbinen, die je nach durchfließender Wassermenge und Fallhöhe unterschiedliche Einsatzbereiche haben.

Die **Kaplanturbine** funktioniert ähnlich wie eine Schiffsschraube, bei der die Achse vertikal gelagert ist. Die Laufradflügel und der so genannte Leitapparat sind verstellbar und können optimal an die Strömungsverhältnisse angepasst werden. Das Wasser strömt entlang der Achse durch das Laufrad. Eine Sonderform der Kaplanturbine ist die **Rohrturbine**, bei der die Drehachse horizontal gelagert ist. Kaplan- und Rohrturbinen werden bei geringen Fallhöhen und großen Volumenströmen eingesetzt und sind gut für schwankende Wassermengen geeignet. Bei den großen Laufwasserkraftwerken in Deutschland mit geringen Fallhöhen von sechs bis 15 Metern sind sie die häufigste Turbinenart. Die konventionelle **Francisturbine** ist eine der ältesten Turbinenarten und wird nach wie vor hauptsächlich im Bereich der Kleinwasserkraftwerke angewendet. Typisch ist das schneckenförmige Gehäuse. Sie wird bei geringen Fallhöhen und mittleren Wassermengen eingesetzt. Bei dieser Turbine ist nur der Leitapparat verstellbar. Das Wasser strömt radial in das Laufrad hinein und verlässt es entlang der Drehachse.



Prüfung einer im Bau befindlichen Turbinenanlage. Durch dieses Schneckenrohr drückt das Wasser später auf die Turbinenschaufeln.

Die **Peltonturbine** ist für große Fallhöhen und kleine Wassermengen geeignet. Das Wasser wird hinter einer Druckleitung mit hoher Geschwindigkeit über Düsen auf die Schaufeln der Turbine gespritzt.

Durchströmturbinen werden für kleine Fallhöhen und Wassermengen genutzt und hauptsächlich bei kleinen Leistungen eingesetzt. Das Wasser strömt tangential durch das Laufrad hindurch.

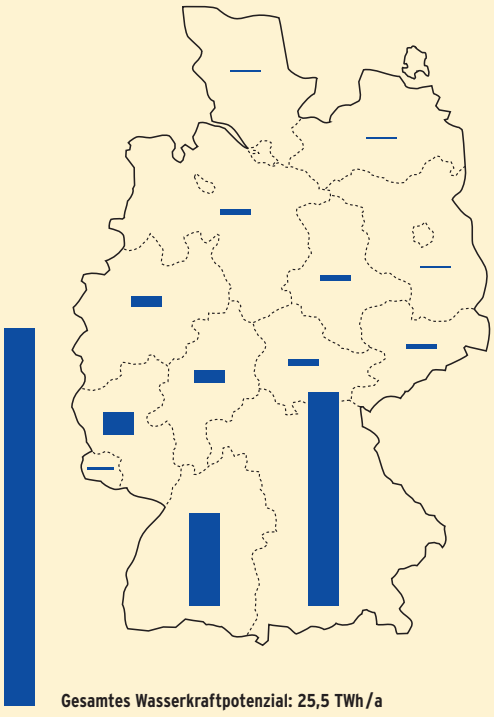
Für geringe Fallhöhen und kleine Leistungen können auch **Wasserkraftschnecken** eingesetzt werden. Diese arbeiten nach dem Prinzip der Archimedischen Schraube und erreichen im Vergleich zu den anderen Turbinen auch bei niedrigem Wasserstand hohe Wirkungsgrade selbst dann, wenn sie nicht voll ausgelastet sind. Die Wasserkraftschnecke zeichnet sich durch geringe Bauwerkskosten und hohe Fischverträglichkeit in Abstiegsrichtung aus. Sie stellt eine Ersatzmöglichkeit für kleine sanierungsbedürftige Turbinen- oder Wasserradanlagen dar.

Kraftwerke

Speicherkraftwerke nutzen die hohe Lage des Wassers und die Speicherkapazität von Talsperren und Bergseen zur Stromerzeugung. Beim Talsperren-Kraftwerk werden üblicherweise Kaplan- oder Francisturbinen eingesetzt,

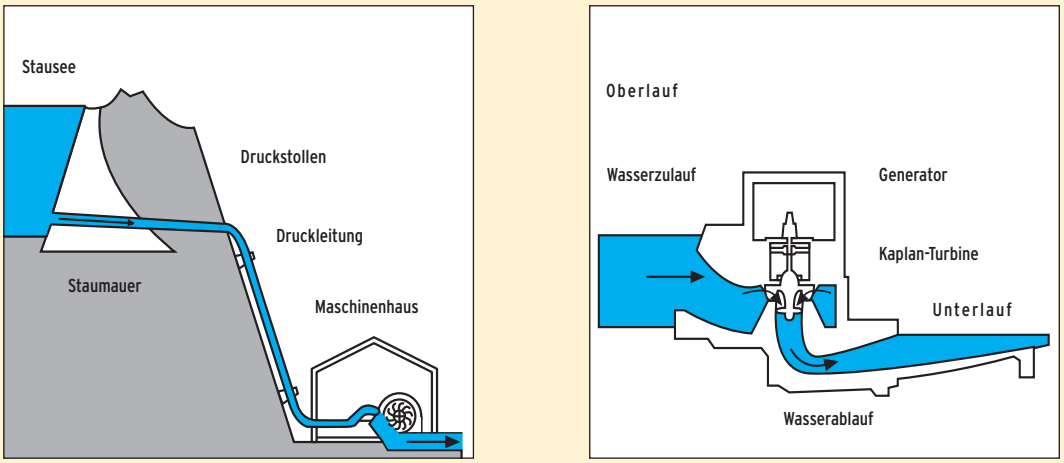
Quelle: Universität Stuttgart

→ Wasserkraftpotenziale



Wasserkraftpotenziale in der Bundesrepublik Deutschland

→ Speicherkraftwerk und Laufwasserkraftwerk



Prinzip eines Talsperren-Speicherkraftwerks und eines Laufwasserkraftwerks

die sich am Fuß der Staumauer befinden. Beim Bergspeicherkraftwerk wird ein in der Höhe liegender See über Druckrohrleitungen mit dem Kraftwerk im Tal verbunden. Wegen der großen Fallhöhe werden meistens Pelton-Turbinen eingesetzt. Speicherkraftwerke können sowohl zur Deckung der elektrischen Grundlast als auch im Spitzenlastbetrieb eingesetzt werden. Pumpspeicherkraftwerke werden nicht durch natürliche Wasservorkommen, sondern durch aus dem Tal heraufgepumptes Wasser aufgefüllt. Damit wird in Schwachlastzeiten – etwa nachts – erzeugter elektrischer Strom zwischengespeichert und kann in Spitzenlastzeiten tagsüber wieder über eine Turbine abgerufen werden (siehe S. 55).

Laufwasserkraftwerke nutzen die Strömung eines Flusses oder Kanals zur Stromerzeugung. Charakteristisch ist eine niedrige Fallhöhe bei relativ großer, oft jahreszeitlich schwankender Wassermenge. Die Anlagen werden aus wirtschaftlichen Gründen oft in Verbindung mit Schleusen gebaut. Bei Laufwasserkraftwerken kommen hauptsächlich Kaplan-, Rohr-, und Durchströmturbinen zum Einsatz.

Potenziale und Kosten

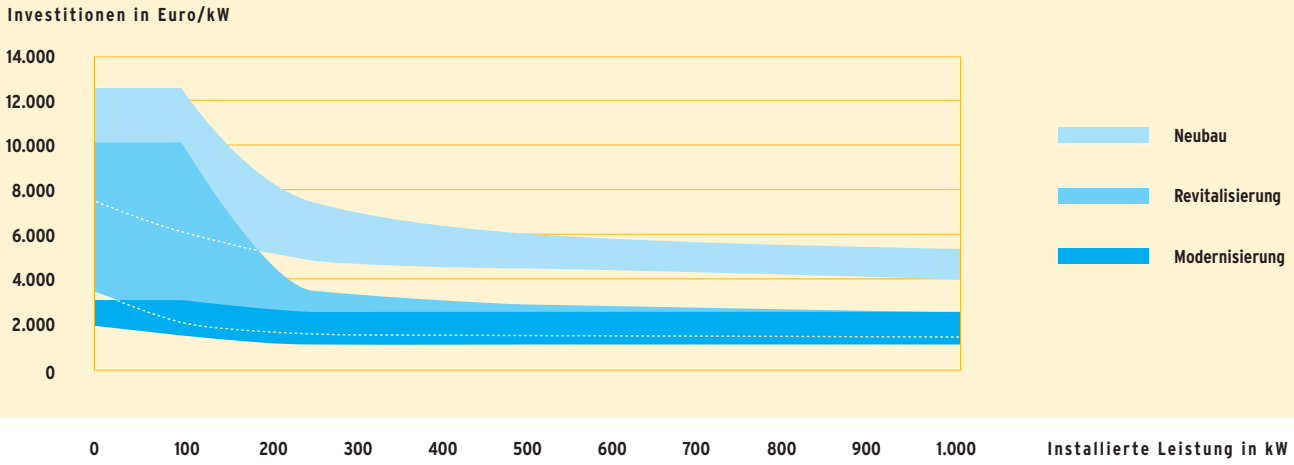
Die Potenziale der Wasserkraft sind in Deutschland weitgehend erschlossen. Darum liegt der Fokus heute auf der Modernisierung großer Laufwasserkraftwerke, auf der Modernisierung und Reaktivierung bestehender Anlagen und dem Neubau an bestehenden Querbauwerken. Verschiedene Studien schätzen das auch unter ökologischen Vorbehalten heute verfügbare Ausbaupotenzial übereinstimmend auf 3 bis 5 TWh/a. Die Vergütung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) ermöglicht für einen Großteil der Vorhaben einen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb.

Turbinenhalle in einem Wasserkraftwerk in Bergisch-Gladbach

Wasserkraftanlagen gelten als technisch ausgereift und lassen keine große Kostensenkung mehr erwarten. Die Kosten einer Wasserkraftanlage werden ganz wesentlich von der installierten Leistung und den örtlichen Randbedingungen wie der Fallhöhe bestimmt. Neue Kleinwasserkraftanlagen zwischen 70 und 1.000 kW Leistung kosten zwischen 8.500 und 10.000 Euro je Kilowatt installierter Leistung. Bei einer typischen Auslastung von 4.000 bis 5.000 Volllaststunden pro Jahr liegen die Stromgestehungskosten einer solchen Anlage zwischen 10 und 20 Cent/kWh. Bei Kleinanlagen unter 100 kW können die für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlichen Stromgestehungskosten teilweise deutlich darüber liegen. Aufgrund der Kostendegression liegen die spezifischen Investitionskosten bei Großanlagen (10 bis 100 MW) zwischen 2.000 und 4.000 Euro/kW, so dass Stromerzeugungskosten in Höhe von 4,5 bis 10 Cent/kWh realisiert

→ Investitionskosten für Kleinwasserkraftwerke

Quelle: IÖW/ISET



Investitionskosten von neuen, reaktivierten und modernisierten Kleinwasserkraftwerken als Funktion der installierten Leistung

werden können. Bei Reaktivierung oder Modernisierung bestehender Anlagen können Stromkosten von 2,5 bis 6,6 Cent/kWh erreicht werden.

Ökologisch verträglicher Ausbau und Modernisierung

Die Nutzung der Wasserkraft kann mit erheblichen Eingriffen in Natur und Landschaft verbunden sein. Will man die noch vorhandenen Potenziale erschließen, muss man vor allem auch den Natur- und Gewässerschutz berücksichtigen. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz regelt für die Vergütung neuer oder modernisierter Anlagen, dass sich der ökologische Zustand des Gewässers mit dem Bau oder der Modernisierung verbessern muss. Neue Laufwasserkraftwerke erhalten nur eine Vergütung, wenn sie an einer bereits bestehenden Stau- oder Wehrstufe oder ohne durchgehende Querverbauung errichtet werden und ein guter ökologischer Zustand erreicht wird oder der ökologische Zustand wesentlich verbessert wird.

Diese Vorgabe steht der Erschließung neuer Wasserkraftpotenziale nicht entgegen. Durch ökologisch wirksame Gestaltungs- und Kompensationsmaßnahmen wie Fischauf- und -abstiegshilfen, die Verbesserung der Strukturvielfalt im Stauraum des Kraftwerks etwa durch Schotterbänke, die Umgestaltung der Flussufer oder eine angepasste Mindestwasserregelung kann der ökologische Zustand des Gewässers gezielt verbessert werden. Natürliche Lösungen wie Bäche, welche die Wasserkraftanlage umlaufen, erleichtern dabei die Wanderung von Fischen und anderen Kleinlebewesen. Die Strömungsgeschwindigkeiten können von Steinen oder Büscheln aus Plastikborsten vermindert werden und geben den Fischen Ruhe und Versteckmöglichkeiten.

Gewässertreppe des Wasserkraftwerks Einsal an der Lenne

Infos zur Wasserkraft

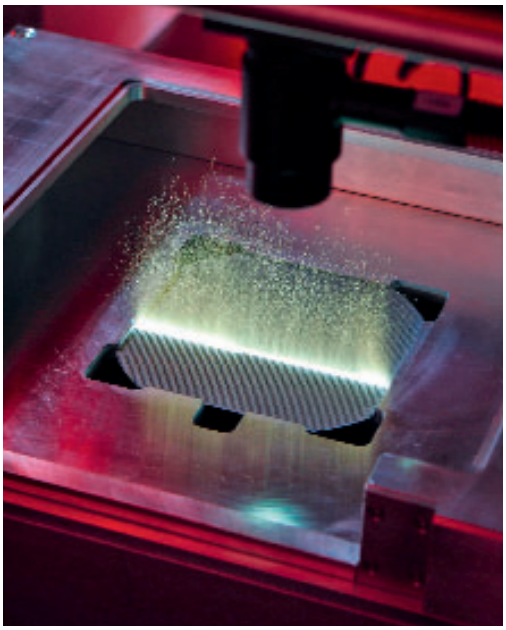
→ Bundesverband Wasserkraft: www.wasserkraft.org

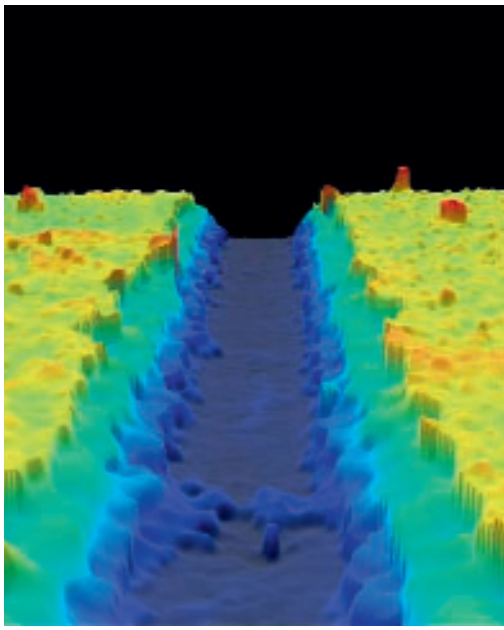
→ Leitfaden des Bundesumweltministeriums für Errichtung und Betrieb von Wasserkraftanlagen unter www.erneuerbare-energien.de

PHOTOVOLTAIK – SONNENSTROM ÜBERALL

Die Fakten:

- **Solarzellen erzeugen in Deutschland 4,0 TWh Strom – mit stark steigender Tendenz – und sparen somit jährlich 2,7 Mio. Tonnen CO_2 ein.**
- **Die Kosten des solar erzeugten Stroms und der Zeitraum der energetischen Amortisation der Solarzellen sinken durch die Effizienzsteigerung in der Produktion permanent .**
- **Durch das EEG entwickelte sich Deutschland zum derzeit größten Markt für Solarenergie weltweit. Deutsche und japanische Solarfirmen sind technisch und ökonomisch führend.**





Photovoltaik-Kraftwerk, Herstellung einer Rückseitenkontaktzelle im Laserverfahren, mikroskopische Aufnahme einer laserstrukturierten CIS-Solarzelle

Solarzellen wandeln Sonnenlicht direkt in elektrischen Strom um. Herzstück jeder Solarzelle ist ein Halbleiter, der meist aus Silizium besteht und den "photovoltaischen Effekt" nutzt: Bei bestimmten übereinander angeordneten Halbleiterschichten entstehen unter dem Einfluss von Licht (Photonen) freie Ladungen, die als Elektronen über einen elektrischen Leiter abfließen können. Der so entstehende Gleichstrom kann direkt zum Betrieb elektrischer Geräte genutzt oder in Batterien gespeichert werden. Wird er in Wechselstrom umgewandelt, kann er auch in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Das ist heute die häufigste Art, den Solarstrom zu nutzen.

Von Milliwatt bis Megawatt: Ein dynamischer Markt

Solarzellen gibt es in allen denkbaren Größenordnungen. Kleinstzellen gelangen in Taschenrechnern und Uhren zum Einsatz. Im Kilowatt-Bereich können sie, in Modulen zusammengefasst, Häuser mit Strom versorgen. Zu großen Solarfeldern zusammengestellt, dringen Solarzellen aber auch in den Megawatt-Bereich vor.

Zwar ist die Sonnenstrahlung in Deutschland nicht so üppig wie in südlichen Ländern. Da Solarzellen aber auch den diffusen Anteil der Strahlung energetisch umsetzen, lohnt sich Photovoltaik auch in unseren Breiten. Die Strahlungsenergie der Sonne ist in den südlichen Bundesländern im Jahresmittel höher als im Norden (siehe Grafik "Globalstrahlung in Deutschland"). Auf einen Quadratmeter fallen jährlich zwischen 1.200 und 900 kWh Strahlungsenergie; eine moderne Solaranlage setzt im Schnitt ein Zehntel davon in Wechselstrom um.

An Fläche besteht kein Mangel: In Deutschland stehen insgesamt 2.300 km^2 auf Dächern, an Gebäudefassaden und an anderen Stellen innerhalb von Siedlungsflächen

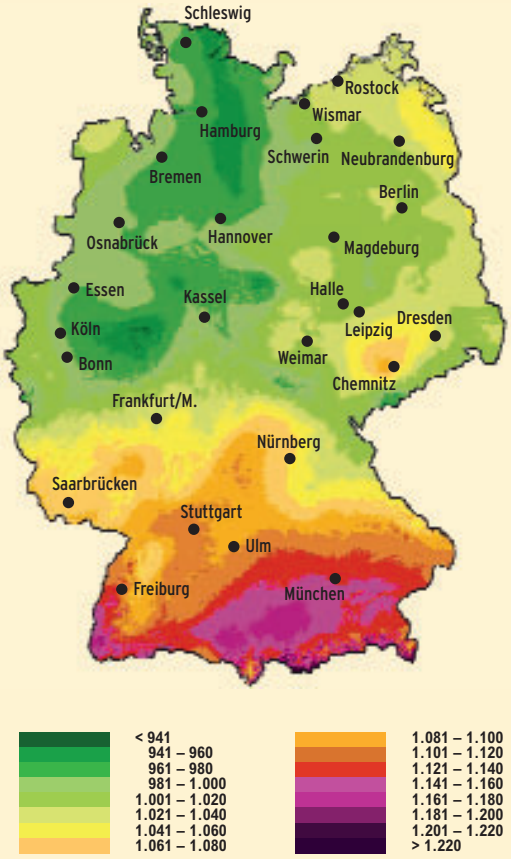
für eine solartechnische Nutzung zur Verfügung. Würden Photovoltaik (Strom) und Solarkollektoren (Warmwasser) diese Fläche je zur Hälfte ausnutzen, könnten Solarzellen 135 TWh Strom pro Jahr erzeugen. Das entspricht knapp einem Drittel des gegenwärtigen Stromverbrauchs.

Zu den Solaranlagen auf Gebäuden kommen zunehmend Anlagen auf freien Flächen hinzu. 2007 wurden bereits knapp 11 % oder 116 MW der installierten Solarzellen-Leistung in so genannten Freiflächen-Anlagen oder Solarparks errichtet. Insgesamt waren in Deutschland Ende 2007 Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen (abgekürzt: PV)mit einer Leistung von über 300 MW installiert. Um den Verbrauch wertvoller Flächen zu vermeiden, werden nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz nur Anlagen auf Flächen mit Vornutzung vergütet. Das können ehemalige Deponieflächen, Industrie- und militärische Brachen sein, aber auch zu Grünland umgewandeltes Ackerland (siehe Abschnitt “Erneuerbare Energien und Naturschutz”). So entsteht die derzeit größte Freiflächen-PV-Anlage mit einer Leistung von 40 MW auf einem ehemaligen Militärflughafen in Brandis bei Leipzig.

Im Jahr 2007 wurden weltweit Solarzellen mit einer potenziellen Leistung von 3.800 MW produziert – 660 MW davon in Deutschland. Dabei stieg die weltweite Produktion seit 2002 jährlich um durchschnittlich 50 %. In Deutschland wird sich diese bis 2010 mit 2500 MW mehr als vervierfacht haben. Weltweit war Deutschland mit einem Zubau von 1100 MW im Jahr 2007 der größte PV-Markt der Welt.

Die Photovoltaik hat in den vergangenen Jahren nicht nur **drastische Nachfragesteigerungen** verbucht, sondern auch eine **deutliche Kostenreduktion** durchlaufen. Seit Mitte der 1990er Jahre konnten die Systemkosten – also die Kosten der fertig montierten Solarmodule – um ca. 60 % reduziert werden; 25 % davon allein zwischen 1999 und 2003. Auch in den folgenden Jahren hat die Produktion der Anlagen hohe Effizienzsteigerungen erzielt. Durch die weltweite Verknappung von hochreinem Silizium – dem Grundstoff für die meisten Solarzellen – hat sich dieser Effizienzgewinn aber lange Zeit nicht in günstigeren Preisen widergespiegelt. Die Investitionskosten für eine Hausdachanlage liegen heute unter 5.000 Euro pro Kilowatt installierter Leistung. Je größer eine Anlage wird, desto geringer fallen die spezifischen Kosten aus, wodurch bei großen Freiflächenanlagen die Preise pro Kilowatt inzwischen unter 4.000 Euro gefallen sind. Während Strom aus PV-Anlagen 1985 noch etwa 1,50 Euro/kWh kostete, liegen die Stromgestehungskosten heute in Mitteleuropa je nach Anwendungsfall und Technologie zwischen 0,30 Euro/kWh bei großen netzgekoppelten Generatoren und bis maximal 0,55 Euro/kWh bei kleineren Anlagen auf Einfamilienhäusern.

→ **Globalstrahlung in Deutschland**



Durchschnittliche jährliche Sonneneinstrahlung in kWh/m²

Quelle: Deutscher Wetterdienst

In Zukunft sollen die so genannten Stromgestehungskosten weiter sinken. Bis 2012 erwartet die Branche noch einmal eine Halbierung der heutigen Kosten. Dafür wird vor allem ein deutlicher Anstieg des Produktionsvolumens verantwortlich sein. Aber auch die Verbesserung der Materialausbeute – heute geht ein Großteil des Halbleitermaterials beim Schneiden der Wafer und anderer Verarbeitungsschritte verloren – und eine Steigerung des Wirkungsgrades der fertigen Zellen werden die Kosten dieser innovativen Technologie weiter senken.

Neue Technologien für die Zukunft

Inzwischen steht eine große Zahl von Halbleitermaterialien für die Herstellung von Solarzellen zur Verfügung. Das wichtigste Element ist nach wie vor das Silizium. Es wird in drei Varianten hergestellt:

- Das teure, aber sehr reine **monokristalline Silizium** ist in der Herstellung besonders aufwändig, weist

Oben: Netzunabhängige PV-Anlagen produzieren Solarstrom ausschließlich für den Eigenverbrauch. Unten: Netzgekoppelte Anlagen speisen den überschüssigen Strom in das Stromnetz ein, wobei diese Einspeisung zu festen Tarifen vergütet wird.

aber die besten Wirkungsgrade für die Umwandlung der Strahlungsenergie auf. Monokristalline Silizium-Zellen haben einen Wirkungsgrad von 15 bis 18 %.

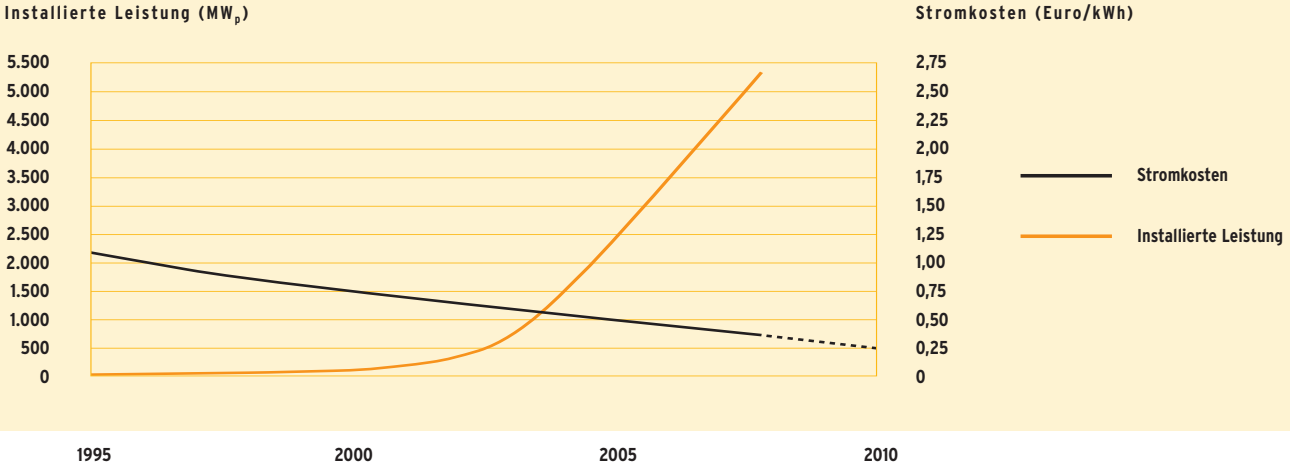
- **Polykristallines Silizium** lässt sich einfacher, schneller und damit kostengünstiger herstellen. Die Korngrenzen zwischen den Kristalliten der Siliziumzelle bremsen jedoch den Strom der Elektronen und führen zu etwas schlechteren Wirkungsgraden. Sie liegen heute bei 13 bis 16 %. Dies schlägt sich in einem Bedarf an größeren Solarflächen und größeren Gestellen nieder.

- Noch billiger in der Herstellung sind **Dünnschichtzellen** aus amorphem Silizium. Allerdings haben sie deutlich niedrigere Wirkungsgrade und die Langzeitstabilität gegenüber den kristallinen Zellen ist geringer, was die Kostenvorteile weitgehend wieder ausgleicht.

Neben dem heutigen Standard-Material Silizium sind eine Vielzahl weiterer Stoffe und Materialkombinationen in der Erprobung und Entwicklung. Vor allem von der **Dünnschichttechnologie**, die mit deutlich weniger Material als die kristallinen Silizium-Zellen auskommt, werden starke Kostensenkungen erwartet. Die wichtigsten Materialien für Solarzellen sind neben dem amorphen Silizium das Gallium-Arsenid (GaAs), Germanium (Ge), Cadmium-Tellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-Diselenid (CIS). Die Dünnschichttechnologie hat in Deutschland mit 10 % der installierten Leistung besonders bei Freiflächenanlagen schon einen wichtigen Markt erschlossen.

→ Marktentwicklung

Quelle: BMU



Marktentwicklung in Deutschland, Verlauf der Stromgestehungskosten von PV-Anlagen und die mögliche zukünftige Entwicklung

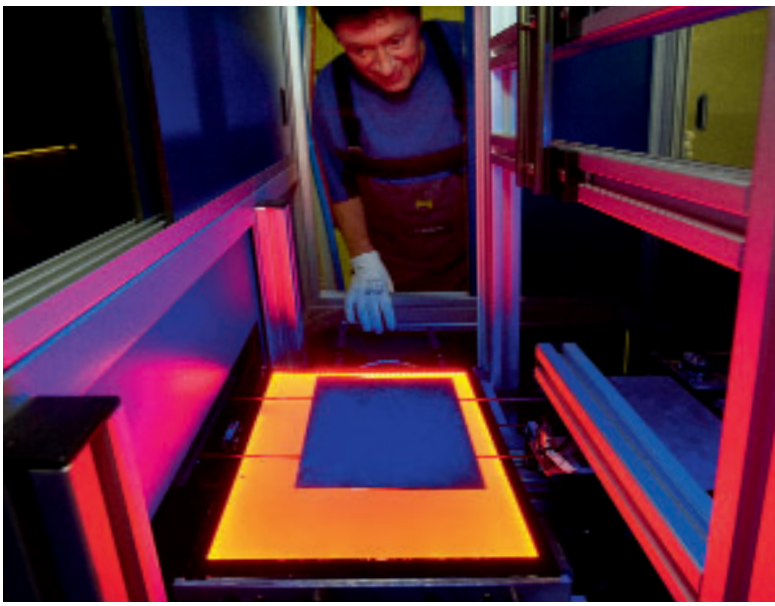
Als vielversprechendes Konzept gelten auch die so genannten **Tandemzellen**. Hier werden mehrere Halbleitermaterialien so kombiniert, dass sie einen größeren Bereich des Spektrums des Sonnenlichtes ausnutzen können. Der derzeit höchste Wirkungsgrad einer Solarzelle wurde im Labor an einer Tandemzelle unter konzentriertem Licht gemessen und betrug knapp über 40 %.

Anwendungen

Netzgekoppelte Anlagen bestehen aus der Solaranlage auf dem Dach oder an der Fassade, die bei direkter oder indirekter Einstrahlung Gleichstrom liefert. Über einen Wechselrichter wird der Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt und kann dann direkt von Haushaltsgeräten genutzt oder ins Netz eingespeist werden. Die Leistung typischer Anlagen auf Gebäuden liegt zwischen 2 und 5 kW. Die derzeit größte gebäudeintegrierte Anlage wurde 2005 auf dem Dach eines Logistikunternehmens in Bürstadt (Hessen) installiert. Sie ist so groß wie fünf Fußballfelder und liefert bis zu 5 MW Solarstrom.

Noch größere Anlagen gibt es auf Freiflächen. Große Solarparks "auf der grünen Wiese" sind allerdings umstritten, da sie zu einem zusätzlichen Flächenverbrauch führen. Die gesetzliche Förderpraxis zielt darauf ab, den Bau großer Solaranlagen auf bereits versiegelte Siedlungsflächen oder auf aus Ackerland umgewidmete Grünlandflächen zu beschränken.

Die Vergütung von Solarstrom wird durch das EEG geregelt. Für Anlagen, die im Jahr 2009 auf normalen Gebäuden installiert werden, beträgt sie 43,01 ct/kWh und bleibt über 20 Jahre konstant. Für später errichtete Anlagen sinkt sie jährlich um 8 %, ab 2011 um 9 %. Bei Solarparks beträgt diese Degressionsrate anfangs sogar 10 %. Zusätzlich kann die Degression um 1 % in Abhängigkeit vom Marktvolumen nach oben oder unten korrigiert werden. Dadurch sind die Hersteller von Solaranlagen gezwungen, jedes Jahr bessere und billigere Solaranlagen herzustellen und die Kosten des Solarstroms gehen ständig zurück.



Herstellung von Solarzellen: Beschichtung von Siliziumwafern mit einer blauen Antireflexionsschicht

Eine wichtige Anwendung der Photovoltaik sind **netzunabhängige Kleinanlagen** zur Versorgung von entlegenen Funk- und Messstationen, Notrufsäulen, Garten- und Wochenendhäusern. Je nachdem, ob die Geräte mit Gleich- oder Wechselstrom arbeiten, ist ein Wechselrichter notwendig. In der Regel werden eine Batterie und ein Laderegler gebraucht, um Schwankungen der Einstrahlung zu überbrücken oder um auch nachts Solarstrom zur Verfügung zu stellen.

Aufbau des weltgrößten Photovoltaik-Kraftwerks in Turnow bei Cottbus mit 53 Megawatt Spitzenleistung und modernster Dünnschichttechnologie.

Montage einer Solarstromanlage mit einer Leistung von 4,6 MW

In Entwicklungsländern, in denen die Versorgungsnetze kaum ausgebaut sind, wird die Photovoltaik für die Versorgung einzelner Häuser (**Solar-Home-Systems**), für Dörfer oder für Pumpen eingesetzt. In vielen Fällen der dezentralen Klein- und Kleinstanwendungen sind die brennstoffunabhängigen und wartungsarmen Systeme die beste und oft auch wirtschaftlichste Lösung für eine netzferne Stromversorgung.

Ökologisch zahlt es sich aus

Solarzellen haben keinen Schornstein: Und auch Luftschadstoffe, Brennstoffverbrauch und Lärm sind mit der Stromerzeugung nicht verbunden. Allerdings ist die Herstellung der Solarzellen energieintensiv. Je nach Verfahren müssen die Zellen hierzulande zwischen zwei und fünf Jahre arbeiten, um die Energie zu produzieren, die ihre Herstellung gekostet hat. Jede weitere Kilowattstunde ist dann aber ökologisch "kostenlos" (siehe Kapitel "Ökologische Qualitäten erneuerbarer Energien"). Setzt man voraus, dass für die Herstellungsenergie der konventionelle Kraftwerkspark eingesetzt wird, so sind folgerichtig indirekte Umwelteinwirkungen zu verzeichnen. Dabei ist aber zweierlei zu beachten: Diese Emissionen sind ein Problem des jetzigen und nicht eines zukünftigen Energiesystems. Würde die Energie zur Herstellung von Solarzellen mit Solarzellen selber erzeugt, so gäbe es diese Emissionen nicht. Außerdem ist das Minderungspotenzial der Solarenergie immens. Durch fortschrittliche Technologien und Massenfertigung, aber auch durch den Übergang auf weniger materialintensive Prozesse lassen sich die "ökologischen Rucksäcke" der Solarzellen noch weiter verkleinern.

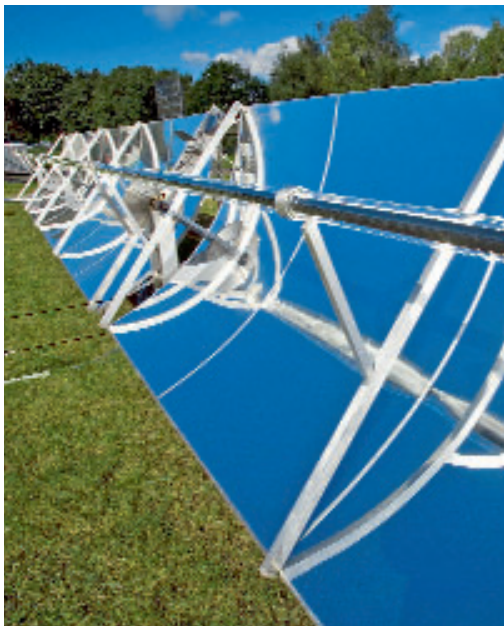
Infos zur Photovoltaik

- → **Allgemein zu Solarenergie: www.solarserver.de**
- → **Bundesverband Solarwirtschaft: www.solarwirtschaft.de**
- → **Internationale Energieagentur (IEA): www.iea-pvps.org**
- → **ForschungsVerbund Sonnenenergie: www.fvs-sonnenenergie.de**
- → **Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie: www.dgs.de**
- → **BINE Informationsdienst: www.bine.info**

SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE – SAUBERE ENERGIE AUS DEM SONNENGÜRTEL DER ERDE

Die Fakten:

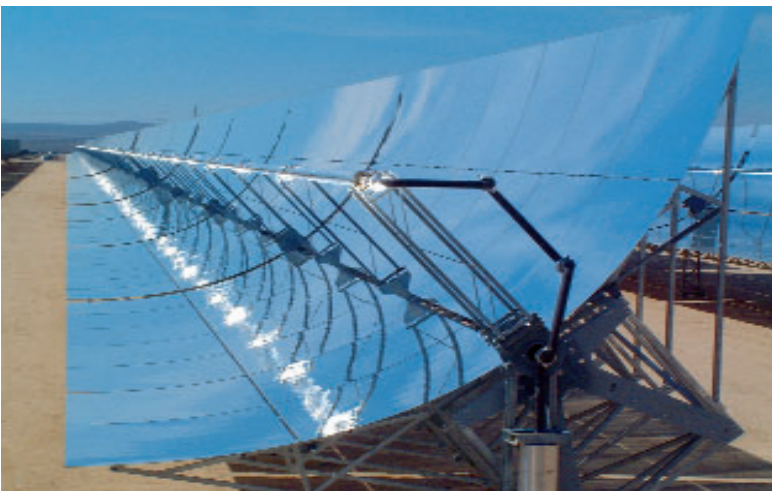
- → **Seit über 20 Jahren beweisen solarthermische Kraftwerke ihre Einsatzfähigkeit und sind in Regionen mit ausreichend hoher direkter Sonneneinstrahlung eine erprobte Alternative zu fossilen Kraftwerken.**
- → **Seit 2006 wird auch in Europa Strom mit solarthermischen Kraftwerken erzeugt. Mehr als 1.500 MW Leistung sind allein in Spanien in Planung. Heute liegen die Stromgestehungskosten zwischen 9 und 22 Cent/kWh. Künftig können sie auf deutlich unter 10 Cent/kWh sinken.**
- → **Die Verwendung von Wärmespeichern erlaubt eine höhere Auslastung der Kraftwerke und macht einen Grundlastbetrieb möglich. So verringern solarthermische Kraftwerke die Abhängigkeit von fossiler und atomarer Stromversorgung.**
- → **Mit einem Leistungsbereich von 10 kW bis 200 MW sind solarthermische Kraftwerke vielseitig einsetzbar: von der Dorfstromversorgung bis hin zur Versorgung weit entfernter Ballungszentren.**



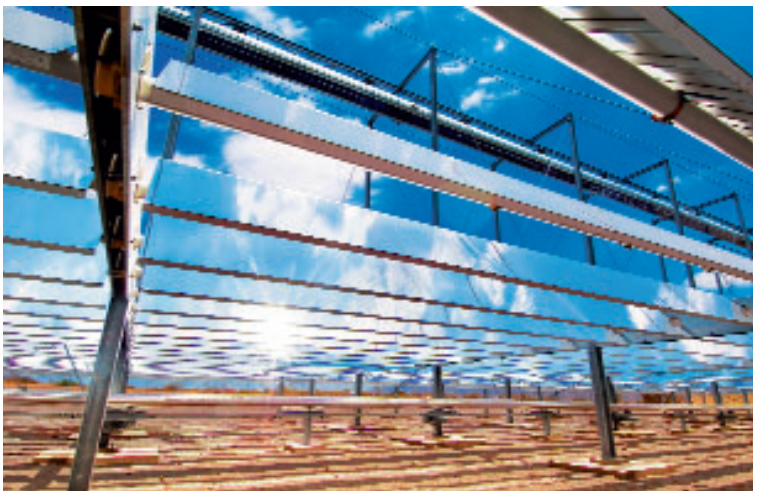
Dish-Stirling-System, Solarturm und Parabolrinnenkraftwerk

In solarthermischen Kraftwerken werden die Sonnenstrahlen mit Brennspiegeln, so genannten konzentrierenden Spiegelsystemen, gebündelt. Sie erhitzen eine Flüssigkeit, die dann eine konventionelle Turbine antreibt. Diese Kraftwerke bestehen also aus einem innovativen Teil zur solaren Wärmeerzeugung und einem konventionellen Teil zur Stromerzeugung. Die Anlagen können zur reinen Stromerzeugung oder zur Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden, also zur Erzeugung von Strom und Prozesswärme. So kann ein solarthermisches Kraftwerk gleichzeitig Elektrizität, Kälte (über eine Absorptionskältemaschine), industriellen Prozessdampf, und sogar Trinkwasser (über eine Meerwasserentsalzungsanlage) erzeugen und dabei bis zu 85 % der geernteten Solarwärme in Nutzenergie verwandeln.

Um rund um die Uhr Energie bereit zu stellen, kann die Turbine von solarthermischen Kraftwerken dann, wenn die Sonne nicht scheint, auch mit fossilen oder erneuerbaren Brennstoffen betrieben werden. Das gewährleistet nicht nur eine Stromqualität, wie man sie von konventionellen Kraftwerken gewohnt ist. Diese doppelte Nutzung – tagsüber als Solar-, nachts als konventionelles Kraftwerk – macht auch den Bau von Reservekraftwerken unnötig und ermöglicht eine Halbierung der Stromkosten gegenüber dem reinen Solarbetrieb. Thermische Speicher, welche die Solarwärme des Tages für den Betrieb in der Nacht aufsparen, werden in Spanien in ersten Parabolrinnenkraftwerken erprobt. Sie sollen in Zukunft die Zufeuerung von fossilen Brennstoffen reduzieren.



Europäischer Parabolrinnenkollektor SKALET im Testbetrieb



Fresnelkollektor auf der "Plataforma Solar de Almería", Spanien

Als Standorte für solarthermische Kraftwerke kommen hauptsächlich die sonnenreichen Zonen der Erde südlich des 40. Breitengrads in Frage, da lediglich der direkte Anteil der Sonnenstrahlung gebündelt werden kann. Der hohe Anteil diffuser Strahlung und die insgesamt niedrigere Einstrahlung erschweren den wirtschaftlichen Einsatz in Ländern wie Deutschland.

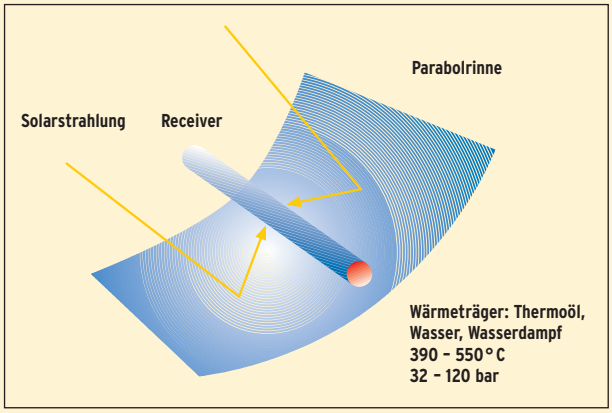
Parabolrinnenkraftwerke

Bei diesem Konzept wird das Sonnenlicht durch parabolisch gekrümmte, bis zu 6 Meter breite und 150 Meter lange Spiegel, auf ein Absorberrohr konzentriert. Das Öl in dem Absorberrohr wird dabei auf etwa 400 °C erhitzt. Die absorbierte Wärme wird mit dem Thermoöl abgeführt und über einen Wärmetauscher zur Dampferzeugung genutzt. Der so erzeugte Dampf dient zum Antrieb eines konventionellen Dampfturbinen-Generators. Auch die Integration in den Dampfteil eines modernen Gas- und Dampfturbinenkraftwerks ist möglich.

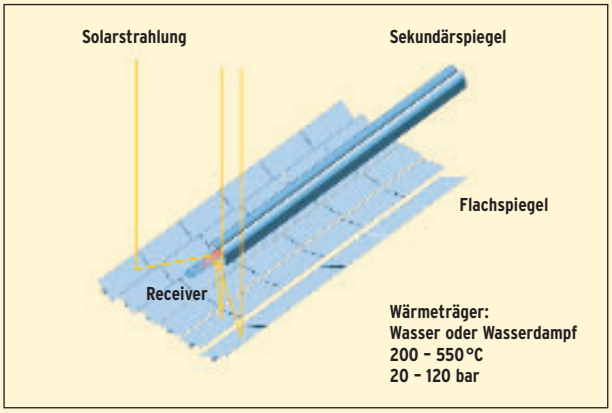
Parabolrinnenkraftwerke werden seit Mitte der achtziger Jahre in Kalifornien betrieben. Insgesamt ist weltweit eine Kapazität von 354 MW installiert, die einzelnen Anlagen haben eine Nennleistung bis zu 80 MW und konnten einen Spitzenwirkungsgrad von über 21 % für die Umwandlung der Solarstrahlung in Wechselstrom nachweisen. Sie versorgen seit ihrer Inbetriebnahme jährlich etwa 150.000 Haushalte mit Strom und haben inzwischen über eine Milliarde US$ an Stromerlösen erwirtschaftet.

2008 wurde das erste kommerzielle Parabolrinnenkraftwerk Europas namens Andasol I (50 MW) in Betrieb genommen. Zwei baugleiche Kraftwerke werden in den nächsten Jahren errichtet und sollen den Strombedarf von 600.000 Menschen decken. Durch die Einspeisung

→ Grundprinzipien konzentrierender Solarsysteme



Parabolrinnenkollektor



Fresnelkollektor

Receiver und Anlagentechnik auf der Turmspitze im Betrieb

Solarturmkraftwerk Jülich

der Solarwärme in einen auf 390 °C erhitzten Salzspeicher, soll hier auch über die Sonnenscheindauer hinaus Solarstrom produziert werden. Eine verbesserte Struktur der Kollektoren, die Optimierung des Betriebs und die direkte Dampferzeugung anstelle des zwischengeschalteten Thermoölkreislaufs werden die Kosten künftig senken. Außerdem wird an höheren Betriebstemperaturen und der Integration von Gasturbinen geforscht.

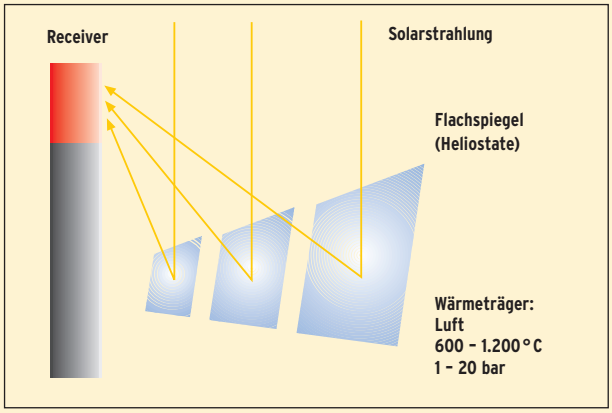
Fresnel-Rinnenkraftwerke

Anfang 2001 wurde ein Rinnenkollektor vorgestellt, bei dem der Konzentrator aus einzelnen Facetten gerader Spiegel besteht. Da die Lichtbündelung dieses Systems schwächer ist als bei Parabolrinnen, hat man über dem Absorberrohr einen Konzentrator angebracht, der das Licht ein zweites Mal bündelt. Im Absorberrohr wird direkt Wasser verdampft. Das System zeichnet sich durch einfache und kostengünstige Bauweise aus und kann zu Anlagen von mehreren hundert Megawatt ausgebaut werden. Nachdem ein Prototyp zur Dampferzeugung über mehrere Jahre betrieben und getestet wurde, soll im nächsten Schritt eine voll funktionsfähige, semikommerzielle Pilotanlage zur Stromerzeugung folgen.

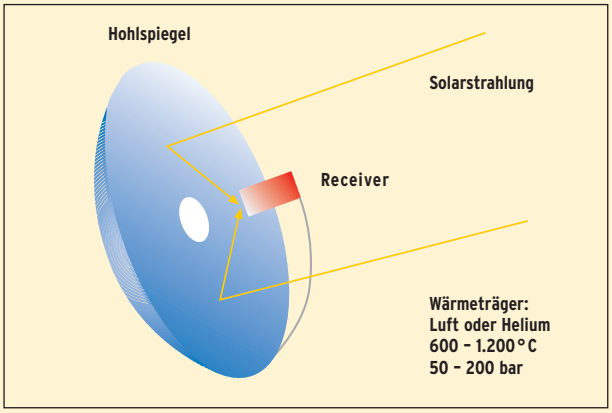
Solarturmkraftwerke

Beim Solarturmkraftwerk wird die Sonnenstrahlung durch ein Feld einzeln nachgeführter Spiegel, so genannter Heliostaten, auf die Spitze eines Turmes konzentriert. Bei diesem Konzept werden Temperaturen über 1.000 °C erreicht. In der Turmspitze befindet sich ein Absorber, der die Strahlung in Wärme umwandelt und an einen Wärmeträger abgibt. Diese heiße Flüssigkeit treibt dann eine Turbine an.

→ Grundprinzipien konzentrierender Solarsysteme



Solarturmanlage



Dish-Anlage

Paraboloidkraftwerk ("Dish-Anlage") mit Stirlingmotor-Generator im Test- und Demonstrationsbetrieb: Der solar-elektrische Wirkungsgrad solcher Anlagen beträgt bis zu 30 %.

Turm des geplanten 200 MW-Aufwindkraftwerks (Höhe 1.000 m, mit speziellen Speichenrädern zur Stütze), unten das Kollektordach (Durchmesser 6 km)

Das erste kommerzielle europäische Solarkraftwerk Planta Solar 10 wurde 2006 fertiggestellt. Auf der Spitze des Turmes der "PS 10-Anlage" wird Wasser in einem Rohrbündelwärmetauscher direkt verdampft. Der Dampf erzeugt in einer Turbine 11 MW elektrische Leistung und 24 GWh Solarstrom pro Jahr.

Beim offenen Luftreceiver – einer deutschen Entwicklung – wird anstelle des Rohrbündelabsorbers ein metallischer oder keramischer Schwamm benutzt. Er wird auch als volumetrischer Absorber bezeichnet, da die Strahlung sowohl an der Oberfläche als auch im Inneren eines porösen Körpers absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Außenluft, die durch den Schwamm nach innen gesaugt wird, erhitzt sich auf über 800 °C und dient anschließend der Dampferzeugung in einem konventionellen Dampfkraftwerk. Der Vorteil gegenüber Rohrbündelabsorbern besteht darin, dass die Wärme nicht durch eine Wand hindurch übertragen werden muss. Dadurch sind höhere Energieflussdichten, Betriebstemperaturen und Wirkungsgrade möglich. Eine solche 49 Meter hohe Pilotanlage wurde 2008 in Jülich fertiggestellt. Mit einer Leistung von 1,5 MW und einer Stromproduktion von etwa 1 GWh pro Jahr sollen Erfahrungen über das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten wie Speicher, Kollektor, Spiegel und zusätzlicher Biomasseverbrennung gesammelt werden.

Eine weitere deutsche Neuentwicklung ist der geschlossene oder druckbeladene volumetrische Receiver (REFOS Konzept). Die Druckluft aus der Kompressorstufe einer Gasturbine wird in diesem Absorber solar erhitzt und treibt dann die Turbine an. Das Prinzip wurde erstmals Ende 2002 auf der Plataforma Solar in Spanien erfolgreich zur Stromerzeugung eingesetzt. Damit wird erstmals der Betrieb solar gefeuerter Gasturbinen möglich. Eine Pilotanlage mit kombinierter Strom- und Absorptionskälteerzeugung wird derzeit für den semi-kommerziellen Einsatz in Italien gefertigt. Mit dieser Technologie wird es auch möglich sein, Sonnenenergie direkt in ein modernes, hocheffizientes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk einzukoppeln und dort mit hohen Wirkungsgraden von über 50 % in Strom umzuwandeln.

Paraboloidkraftwerke/Dish-Anlagen

Mit typischen Leistungen ab wenigen bis einigen 10 kW sind Paraboloidkraftwerke – auch Dish-Anlagen genannt – besonders für den dezentralen Einsatz geeignet. Bei diesem Konzept konzentriert ein zweiachsig der Sonne nachgeführter Parabolspiegel (englisch Dish) die Sonnenenergie direkt auf einen im Brennpunkt des Spiegels aufgehängten Absorber. In diesem wird ein Arbeitsgas (Helium oder Luft) zum Antrieb eines Stirling Motors oder einer Gasturbine, die unmittelbar neben dem Absorber angeordnet sind, auf etwa 900 °C erhitzt.

Dish-Anlagen haben ihre technische Reife in mehreren Jahren Testbetrieb demonstriert und dabei mit bis zu 30 % die besten Wirkungsgrade erreicht, die bei Solaranlagen überhaupt nachgewiesen wurden. In einem nächsten Schritt gilt es, eine Serienfertigung aufzubauen und so das Kostensenkungspotenzial dieser Technologie zu erschließen.

Dieser Kraftwerkstyp eignet sich vor allem für die Dorfversorgung in Entwicklungsländern. Mehrere Systeme lassen sich dabei zu einem kleineren Kraftwerkspark zusammenschalten. In Kombination mit einer Biomasse-Feuerung oder einem speziell für diese Technik entwickelten Speicher ist auch ein Betrieb rund um die Uhr möglich.

Aufwindkraftwerke

Anders als bei den bisher beschriebenen, konzentrierenden Systemen wird die Sonnenstrahlung nicht über ein

Spiegelsystem umgelenkt oder gebündelt. Beim Aufwindkraftwerk wird Luft unter einem riesigen Kollektordach aus Glas oder Kunststofffolie durch die Sonne erwärmt. Diese Luft strömt zu einem in der Mitte des Kollektordachs stehenden Kamin und steigt durch den Kamin auf. Durch die Luftströmung werden am Fuß des Kamins eingebaute Turbinen angetrieben, die Strom erzeugen. Auf diese Weise werden drei physikalische Effekte miteinander kombiniert:

- Der Treibhauseffekt, der zur Erwärmung der Luft unter dem Glasdach führt.
- Der Kaminzug, der für das Aufsteigen der unter dem Glasdach erwärmten Luft im Kamin sorgt.
- Die Turbine, die der Luftströmung im Kamin Energie entzieht und über einen Generator in elektrische Energie umwandelt.

Aufwindkraftwerke arbeiten ausschließlich mit Luft, sie benötigen kein Kühlwasser. In vielen sonnenreichen Ländern, die bereits große Wasserversorgungsprobleme haben, ist dies ein großer Vorteil. Da die Solarstrahlung im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Anlagen nicht konzentriert wird, kann auch die diffuse Strahlung zur Lufterwärmung unter dem Glasdach genutzt werden. Dadurch ist ein Kraftwerksbetrieb auch bei ganz oder teilweise bedecktem Himmel möglich. Der Erdboden unter dem Kollektor kann zusätzlich als natürlicher Wärmespeicher dienen und so für eine gleichmäßige Stromerzeugung sorgen. Mit der auf diese Weise am Tag gespeicherten Wärme lässt sich daher auch nach Sonnenuntergang Strom erzeugen.

Die technische Machbarkeit dieses Konzeptes wurde in mehrjährigem Betrieb in einem spanischen Versuchskraftwerk nachgewiesen. Derzeit werden mehrere Projekte für große Aufwindkraftwerke entwickelt. Am weitesten fortgeschritten ist eine Projektierung in Australien, wo eine 200 MW Anlage mit 1.000 m Kaminhöhe und einem Kollektordurchmesser von 6 bis 7 km entstehen soll.

Speichertechnologien

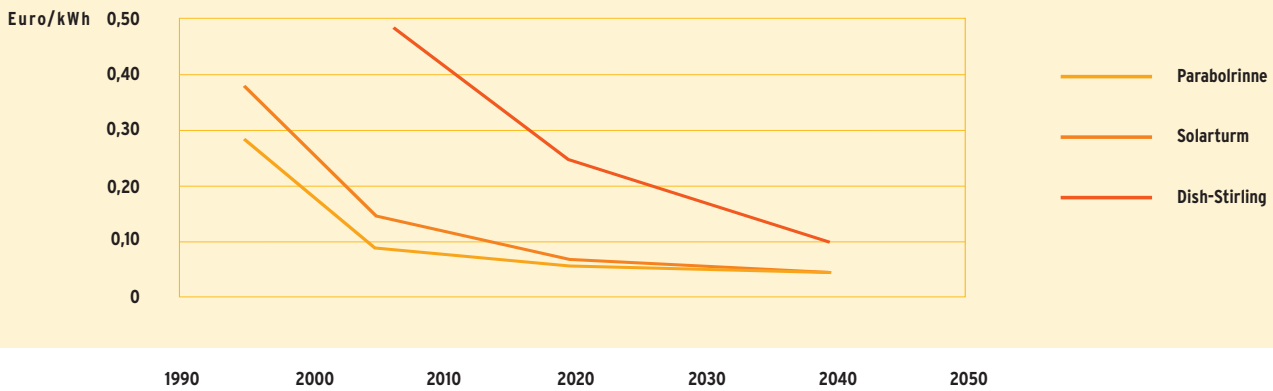
Ein besonderer Vorteil solarthermischer Kraftwerke ist die Möglichkeit, die absorbierte Sonnenenergie als Wärme zu speichern. Dies ist wesentlich einfacher und kostengünstiger als die Speicherung von Elektrizität. Im einfachsten Fall wird dafür ein Medium wie Beton oder geschmolzenes Mineralsalz tagsüber durch den Wärmeträger des Sonnenkollektors aufgeheizt und nachts oder bei Wolkendurchgang zur Dampferzeugung in einem Kraftwerksblock genutzt. Wenn das Speichermedium zudem seinen Zustand von fest zu flüssig ändern kann, lässt sich Wärme noch effizienter speichern. Daher werden auch Speicherkonzepte entwickelt, die auf solchen so genannten Phasenübergängen beruhen. Mit fortschrittlichen Speichertechnologien werden solarthermische Kraftwerke in Zukunft sowohl die elektrische Grundlast als auch Spitzenlast frei regelbar und kostengünstig bereitstellen können, ohne Brennstoffe für die Zufeuerung zu verbrauchen.

Solare Kraft-Wärme-Kopplung

Wie alle konventionellen Wärme-Kraft-Maschinen können auch die Turbinen solarthermischer Kraftwerke zur Kraft-Wärme-Kopplung benutzt werden (siehe Kapitel “Neue Versorgungsstrukturen”). Dazu wird bei der Dampfturbine ein Teil des Dampfes oder bei der Gasturbine die Abwärme nach der Stromerzeugung abgezweigt und weiter genutzt. Die noch in der Wärme gespeicherte Energie kann als Wärmequelle für industrielle Verfahren dienen, zur Erzeugung von Kälte über Absorptionskälteanlagen oder auch zur Entsalzung von Meerwasser. Mit solchen Anlagen wird die solar erzeugte Wärme mit einem Wirkungsgrad von über 80 % in Nutzenergie umgewandelt.

→ **Stromkostenentwicklung**

Quelle: DLR



Schätzung der Kostenentwicklung solarthermischer Kraftwerke im reinen Solarbetrieb bei 8 % Zinsen, einer wirtschaftlichen Lebensdauer von 25 Jahren und einer angenommenen Einstrahlung von 2.300 kWh/m²a

Parabolrinnenkraftwerk Andasol

Kosten solarthermischer Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke können an guten Standorten ohne Energiespeicher etwa 2.000 bis 3.000 Stunden pro Jahr im reinen Solarbetrieb arbeiten. Daraus ergeben sich heute je nach Standort und veranschlagtem Zinssatz Kosten der Stromerzeugung von 9 bis 22 Cent/kWh. Wenn die vorhandenen Möglichkeiten, die Kosten weiter zu senken, durch die anstehende globale Markteinführung erschlossen werden, könnten die Kosten binnen zehn Jahren etwa halbiert werden. Für die Mittelmeeranrainerstaaten rechnen Experten mit Stromgestehungskosten von rund 5 Cent/kWh.

Ein Hybridbetrieb, also die Zufeuerung von Brennstoffen, führt zu einer besseren Auslastung des Kraftwerkteils der Anlagen, da auf diese Art mehr Betriebsstunden erreicht werden können. Damit wird die Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionell betriebenen Kraftwerken deutlich verbessert. Je nach Anteil der Zufeuerung und abhängig von den Brennstoffpreisen können die Stromgestehungskosten gegenüber dem reinen Solarbetrieb um etwa die Hälfte niedriger liegen (Grafik “Stromkosten”). So erreicht man Stromkosten, die im Bereich ölgefeuerter Kraftwerke liegen, sofern deren Brennstoff nicht subventioniert wird.

Energiespeicher erhöhen den Solaranteil des Kraftwerks, verbessern das Betriebsverhalten, bewirken eine höhere Ausnutzung des Kraftwerkblocks und verbessern die Erlössituation. Das Zusammenwirken aller genannten Faktoren führt dazu, dass die solaren Stromkosten eines solarthermischen Kraftwerks mit integrierter Speichertechnik gegenüber dem Betrieb ohne Speicher sinken. Zu diesem Zweck werden zurzeit kommerzielle solarthermische Speicherkonzepte entwickelt und erste Anlagen gebaut.

Die weltweite Markteinführung solarthermischer Kraftwerke steht bevor

Im Februar 2006 erfolgte der erste Spatenstich für ein neues 64 MW Parabolrinnenkraftwerk in Nevada, USA. Nach Einführung eines Einspeisegesetzes für Solarstrom in Spanien gibt es auch dort eine ganze Reihe interessanter solarthermischer Kraftwerksprojekte, zum Teil auch schon mit integriertem thermischen Energiespeicher. Weltweit sind mehr als 100 Kraftwerksprojekte in Planung, u. a. in Algerien, Marokko, Ägypten, Italien, Israel, Abu Dhabi und Indien.

Solarthermische Kraftwerke stellen ein wichtiges Bindeglied zwischen der heutigen fossilen und der zukünftigen “solaren” Energieversorgung dar, da sie wesentliche Elemente beider vereinen. Sie nutzen herkömmliche Kraftwerksprozesse und kombinieren sie mit solaren Technologien. Durch die Kraft-Wärme-Kopplung (insbesondere zum Zwecke der Trinkwasserbereitung aus Meerwasser) erlauben sie eine äußerst effiziente Nutzung der solaren Primärenergie.

Unter Einbindung der Mittelmeeranrainerstaaten von Europa, des Mittleren Ostens und Nordafrikas (EU-MENA) in ein transnationales Energieversorgungsnetz könnte die Stromversorgung Europas weiter diversifiziert und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen erheblich reduziert werden. Demnach wäre es 2050 möglich, bis zu 15 % (700 TWh) des europäischen Strombedarfs aus solarthermischen Kraftwerken der MENA-Regionen abzudecken. Insgesamt würden 0,3 % der Wüstenfläche ausreichen um die MENA-Staaten und Europa komplett mit Strom und entsalztem Wasser zu versorgen. Vorrausetzung ist die Installation von verlustarmen Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetzen, um die enormen Entfernungen von bis zu 3.000 Kilometern zu überbrücken.

Infos zu solarthermischen Kraftwerken

- → Solarthermische Stromerzeugung – saubere Energie für eine nachhaltige Entwicklung: www.solar-thermie.org
- → Solarforschung und Studien zu Solarthermischen Kraftwerken: www.dlr.de/tt
- → Solarthermische Kraftwerksprojekte: http://www.solarpaces.org/
- → Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation: http://www.trec-eumena.org/
- → Solare Strahlungsressourcen: www.solemi.de

SONNENKOLLEKTOREN UND PASSIVE SOLARNUTZUNG – DIE SONNE INS HAUS GEHOLT

Die Fakten:

- Sonnenkollektoren eignen sich zur Erwärmung von Trinkwasser und zur Aufbereitung von heißem Wasser für die Heizungsanlage.
- Mehr als 1,2 Millionen Solarthermieanlagen mit elf Millionen Quadratmetern Fläche in Deutschland versorgen Haushalte, Wohnsiedlungen, Gewerbe- und Industriebetriebe mit Wärme und Kälte. Gegenüber fossilen Wärme- und Kälteanlagen sparen sie jährlich 900.000 Tonnen CO_2 ein.
- Großes Potenzial liegt in der Speicherung von Solarwärme im Sommer für den Winter und der Verteilung von heißem Wasser über Nahwärmenetze.
- Mit Solarthermieanlagen lässt sich auch Kälte erzeugen. Das lastet die Solaranlagen optimal aus und erlaubt eine klimafreundliche und effiziente Kühlung von Gebäuden.
- Durch eine sorgfältige architektonische Gebäudeplanung – gute Dämmung, Passivhaus-Fenster, Gebäudeausrichtung – kann auch die "passive Solarnutzung" den Heizwärmebedarf wesentlich senken.

Flachkollektoren, transparente Wärmedämmung und Vakuumröhrenkollektoren

Mit Solarkollektoren wird die Strahlung der Sonne in Wärme umgesetzt, um Wasser für den täglichen Bedarf zu erwärmen oder Gebäude zu heizen. Das Prinzip ist ähnlich der Erwärmung eines Gartenschlauchs in der Sonne: Nach kurzer Zeit erhitzt sich in seinen Windungen das Wasser. Auch zum Kühlen und Entfeuchten der Raumluft kann die Wärme eines Sonnenkollektors verwendet werden. Einige Verfahren nutzen dabei die Kälte, die bei der Verdunstung von Wasser entsteht. Dieses Prinzip machten sich schon die alten Römer bei der Kühlung von Früchten in feuchten Tongefäßen zu Nutze und noch heute sind offenporige Weinkühler aus Ton verbreitet.

Um Wärme zu erzeugen, fließt in der einfachsten technischen Variante ein Wärmeträgermedium durch nicht abgedeckte, schwarze Kunststoffmatten, die **Absorber** genannt werden. Solche Anlagen erreichen keine hohen Temperaturen. Dafür sind sie günstig und werden beispielsweise für die Erwärmung des Badewassers in Freibädern eingesetzt. Da sie meist kostengünstiger sind als fossil gefeuerte Heizkessel, können sie die Betriebskosten eines Bades deutlich reduzieren.

Technisch ausgefeilter sind **Flachkollektoren**. Um die Wärmeverluste des Kollektors zu vermindern, ist der Absorber, der aus Metall besteht, auf den sonnenabgewandten Seiten gut isoliert und zur Sonne hin mit einer

Kollektoranlage zur Warmwasserbereitung

Glasscheibe abgedeckt. Diese Scheibe ist mit einer speziellen Antireflexschicht versehen, um Reflexionen zu minimieren. Eine weitere Verminderung der Abstrahlungsverluste lässt sich durch Aufbringung von schwarzem Solarlack oder noch wirksameren selektiven Schichten wie Schwarznickel oder Schwarzchrom erreichen. Bei gleicher Sonnenstrahlung kann ein solcher Flachkollektor höhere Wassertemperaturen erzielen als die schwarzen Kunststoffmatten.

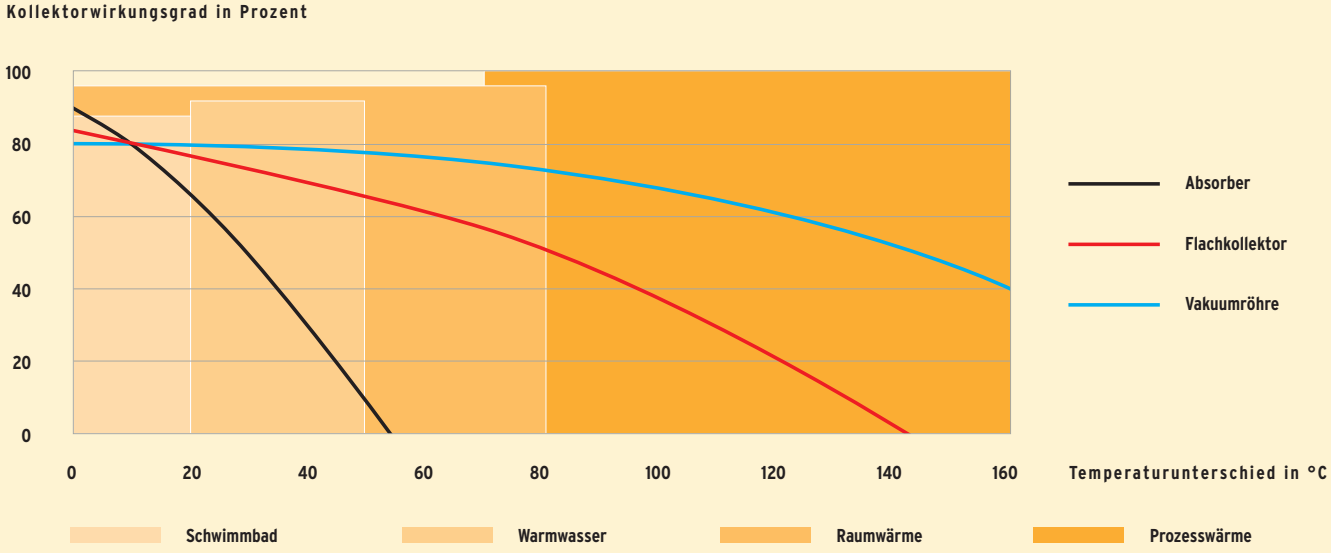
In **Vakuumröhrenkollektoren** liegen die Wärmeabsorber in gläsernen, beinahe luftleeren Röhren. Dadurch geht weniger Wärme als beim Flachkollektor an die umgebende Luft verloren (konvektiver Verlust). Dieser Kollektortyp wird mit einem durchlaufendem Wärmeträgerrohr gebaut, so genannte “heat pipes”, in denen ein wärmeempfindliches Medium beim Erwärmen verdampft, aufsteigt, seine Wärme an einen Kondensator außerhalb des Rohres abgibt und wieder zum Anfang des Kreislaufs fließt, um erneut Wärme aufzunehmen. Durch die hohen erreichbaren Temperaturen eignen sich Vakuumröhrenkollektoren auch für die Bereitstellung von Prozesswärme.

Ein typisches Warmwassersystem für ein Einfamilienhaus nimmt eine **Dachfläche von 6 m²** ein und kann bis zu **60 % des jährlichen Brauchwasserbedarfs** bereitstellen. Eine solche Anlage deckt im Sommer den Bedarf vollständig ab, in den anderen Jahreszeiten muss ein konventioneller Kessel das vom Kollektor vorgewärmte Wasser nachheizen (Abbildung “Kollektoranlage”). Um einen hohen Wirkungsgrad des Kollektors, egal welcher Bauart, zu erreichen, sollte das erforderliche Temperaturniveau der genutzten Wärme niedrig sein. Soll mit einer Anlage auch Raumwärme bereitgestellt werden, bieten sich daher Fußboden- oder Wandflächenheizungen an. Mit einer Anlage von 11 m² (Vakuumröhrenkollektor) bis 14 m² (Flachkollektor) lassen sich bei einem gut gedämmten Haus etwa 20 bis 30 % des gesamten Wärmebedarfs solar abdecken. Insbesondere in den Übergangszeiten im Frühling und Herbst leisten die Kollektoren gute Dienste.

Die Ausrichtung des Kollektors nach Süden und seine Neigung spielen dabei eine weit geringere Rolle als gemeinhin angenommen (Grafik “Wärmeertrag und Südausrichtung”). Modellrechnungen zeigen, dass Abweichungen von +/− 60° von der genauen Südausrich-

→ Wirkungsgradkennlinien

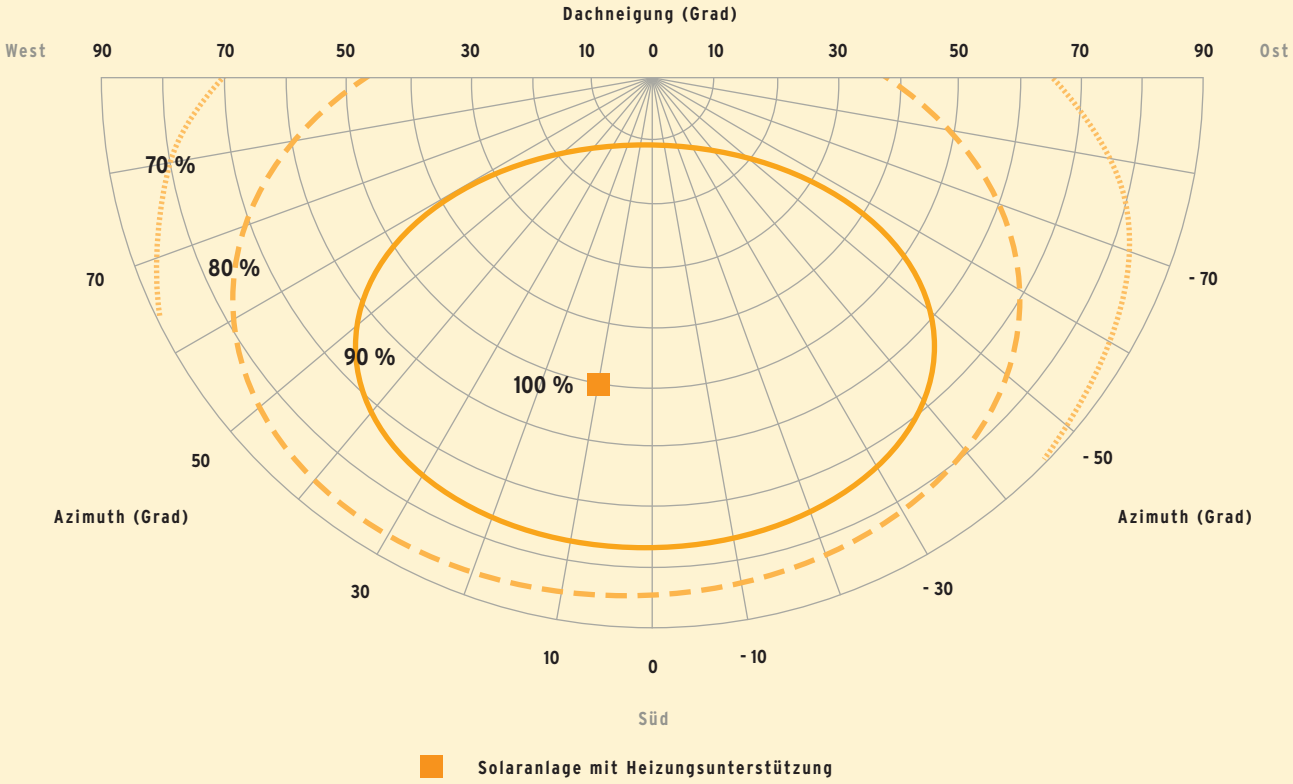
Quelle: DLR



Je besser der Kollektor isoliert ist, desto höher ist die Temperatur der erzeugten Wärme. Wirkungsgradkennlinien unterschiedlicher Kollektortypen bei 500 W/m² Einstrahlung und die sich daraus ergebenden Einsatzfelder.

→ Wärmeertrag und Südausrichtung

Quelle: DLR



Linien gleichen Wärmeertrags: Die Ausbeute (maximal 100 %) nimmt nur relativ geringfügig ab, wenn der Kollektor nicht genau nach Süden ausgerichtet ist.

tung eine Einbuße der Sonnenernte von nur 10 % zur Folge haben. Weicht die Neigung um 20° von der in unseren Breiten optimalen Neigung von 50° ab, so geht der Energieertrag um etwa 5 % zurück.

Für eine Solarkollektoranlage ist ein **Speicher** unerlässlich. Er nimmt die vom Kollektor bereitgestellte Wärme auf und gibt sie ab, sobald Bedarf besteht.

Solarkollektoranlagen zur Brauchwassererwärmung benötigen im Einfamilienhaus einen Speicher von rund 350 Liter Inhalt. Wird der Sonnenkollektor auch zur Raumheizung eingesetzt, werden größere Speicher mit einem Volumen von rund 70 Liter je Quadratmeter Kollektorfläche benötigt. Daraus ergeben sich Speichergrößen um die 1.000 Liter. Sie können Wärme für einige Tage speichern.

Um die im Sommer gespeicherte Wärme im Winter nutzen zu können, sind erheblich größere Reservoire und Kollektorflächen notwendig. Hierzu gibt es in Europa eine Vielzahl von Demonstrationsprojekten. Die derzeit größte deutsche Anlage in Neckarsulm wird im Endausbau 1.200 Wohnungen auch im Winter mit solarer Wärme aus 15.000 m² Kollektoren und einem 150.000 m³ großen Speicher versorgen. Die Kollektoren befinden sich auf den Dächern einer Schule, Sporthalle und einigen Wohngebäuden. Zudem wurden sie auch über Parkplätzen aufgeständert und entlang eines Lärmschutzwalls installiert. Ein ähnliches Projekt wird derzeit in Crailsheim realisiert. Für die saisonalen Speicher müssen schon wegen ihrer schieren Größe kostengünstige Lösungen gefunden werden. Dann lassen sich mit ihnen solare Deckungsanteile für Raumwärme und Warmwasser von 60 % erreichen.

In Neckarsulm werden die Parkplatzflächen zur Wärmeerzeugung genutzt.

Montage einer Kollektoranlage zur Warmwasserbereitung

Die thermische Solaranlage auf dem Dach versorgt zwei 800 Liter Warmwasserspeicher im Keller.

In Neckarsulm wird die Wärme gespeichert, in dem der vorhandene Lehmboden mit Erdsonden aufgewärmt wird und so als billiges Speichermedium dient. Andere Projekte speisen das warme Wasser im Sommer in unterirdische, wasserführende Schichten (Aquifere) ein, nutzen Schüttungen aus grobkörnigem Kies und Wasser oder teilweise ins Erdreich versenkte wassergefüllte Betonbehälter. Jedes dieser Speicherkonzepte hat seine Vor- und Nachteile. Eine erfolgreiche Entwicklung kostengünstiger Langzeitspeicher wird der Solarenergie Anwendungsfelder erschließen, die weit über die heute noch vorherrschende sommerliche Brauchwassererwärmung hinausgehen.

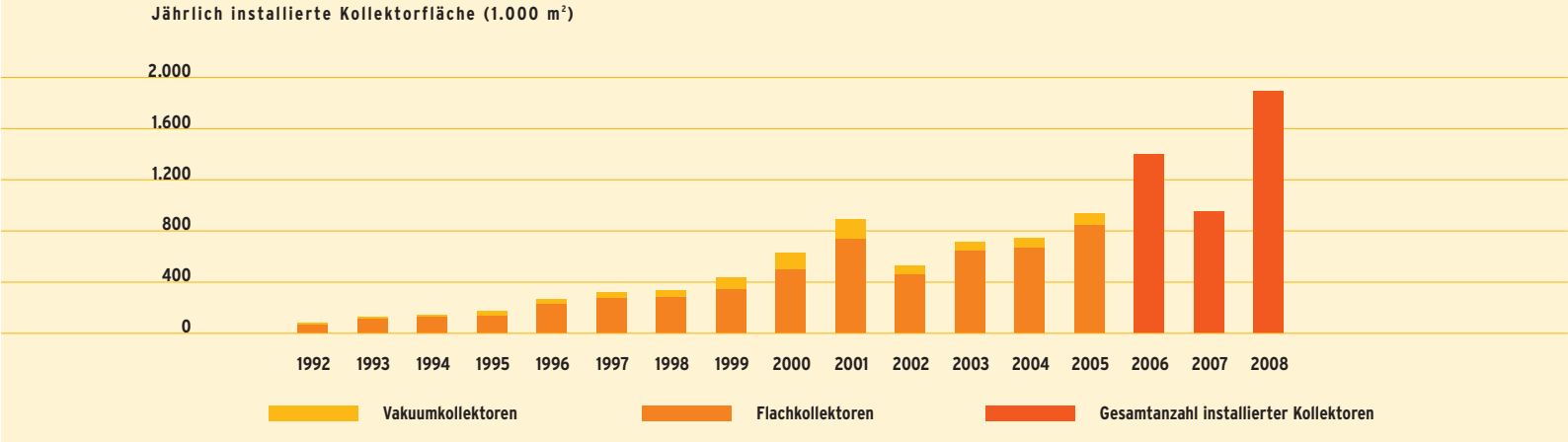
Technische Trends

Solarkollektoranlagen garantieren heute einen zuverlässigen Betrieb über 20 Jahre. Zuletzt gab es weitere Verbesserungen der Technik durch den Einsatz neuer selektiver Schichten auf der Absorberoberfläche, welche die Abstrahlung verringert und damit den Wirkungsgrad erhöht. Zudem sind diese Schichten umweltfreundlicher als die bisher eingesetzten galvanischen Oberflächen und auch unempfindlicher gegenüber mechanischen Einflüssen wie Regen und Hagel und hohen Temperaturen. Bei Flachkollektoren konnten die Reflexionsverluste an der Abdeckungsverglasung durch eine besondere Oberflächenbehandlung reduziert werden. Niedrigere Durchflussraten durch den Kollektor erlauben den Einsatz von Zu- und Ableitungen mit geringerem Durchmesser. Dadurch können dünnere Rohrisolierungen eingesetzt und der Materialaufwand erheblich reduziert werden. Speziell für den Solarbetrieb angepasste Umwälzpumpen reduzieren zudem den Stromverbrauch.

Um die Kosten weiter zu mindern, werden die Einzelmodule immer größer und die Montagetechnik auf dem Dach wird vereinfacht. Dies geht soweit, dass die Kollek-

→ Installierte Kollektorfläche

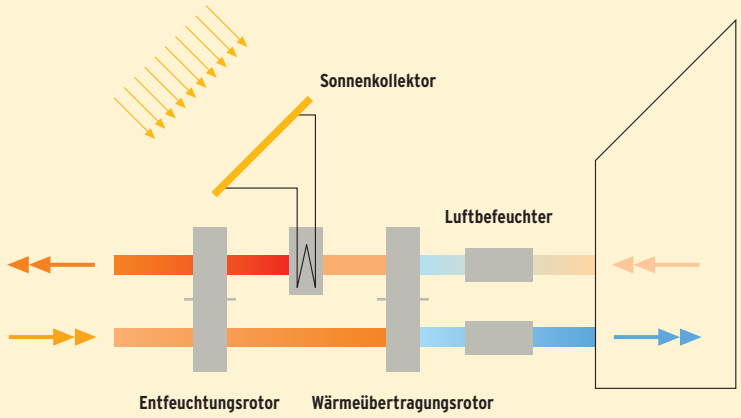
Quelle: BMU



Seit 1992 ist der Kollektorabsatz ungefähr auf das Zwanzigfache gestiegen.

→ Kühlung nach dem offenen Verfahren

Quelle: DLR



Bei diesem Verfahren wird Luft gekühlt und entfeuchtet (auch "Desiccant"-Verfahren genannt). Das technische Kernstück bildet die Entfeuchtungsanlage.

toren die konventionelle Dachhaut wie Dachpfannen und -sparren komplett ersetzen, so dass der Bauherr die Kosten für Teile des Dachstuhls einspart. Die Regelung des Systems und seine Pumpen werden in vormontierten, integrierten Baugruppen geliefert. Auch werden lötfreie Rohrverbindungen angeboten, die die Montage erheblich vereinfachen und es begabten Laien ermöglichen, die Anlagen selber aufzubauen.

Kosten

Durch technische Fortentwicklung und Marktausweitung konnten die Preise für das Gesamtsystem binnen einiger Jahre deutlich gesenkt werden. Heute rechnet man mit spezifischen Investitionskosten für eine komplette Anlage inklusive Speicher, Verrohrung und Montage von 700 bis 900 Euro pro m² Kollektorfläche. Solarkollektoren stehen an der Schwelle der Wirtschaftlichkeit und schützen die Bauherren gegen die Risiken zukünftiger Energiepreiserhöhungen.

Marktentwicklung

Ende 2008 waren etwa 11 Mio. m² Kollektoren auf deutschen Dächern installiert. Ihre Wärme ersetzt deutlich über 4 Mrd. kWh an fossilen Brennstoffen, was einer Menge von mehr als 400 Mio. Liter Heizöl entspricht. (Grafik "Jährlich installierte Kollektorfläche") Nach einem eher schwachen Jahr 2007 wurde 2008 mit mehr als 1,9 Mio. m² neu installierter Kollektorfläche mehr Solarwärme erschlossen als je zuvor in Deutschland. Die Marktpotenziale erneuerbarer Energie im Wärmebereich sollen durch den Ausbau des Marktanreizprogramms und durch weitere Instrumente, wie die neu eingeführte Pflicht zum Einsatz von erneuerbaren Energien im Neubau durch das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, noch besser erschlossen werden.

Anders als bei der Photovoltaik ist Deutschland bei der Nutzung solarer Wärme bei weitem nicht der weltweite Spitzenreiter. Das Nachbarland Österreich hat je Kopf der Bevölkerung die vierfache Menge an Solarkollektoren installiert. Dort sind die Kollektoren auch bereits zu einem lukrativen Exportschlager geworden. Andere EU-Länder wie Frankreich, Italien oder England hinken dagegen der Entwicklung noch weit hinterher. Der weltweit mit Abstand größte Markt für Solarkollektoren ist China.

Einen weiteren Schub für die Marktausweitung erhofft man sich durch größere Anlagen. Noch wird der ganz überwiegende Teil der Sonnenkollektoranlagen auf Dächern von Einfamilienhäusern installiert. Auf Mehrfamilienhäusern oder anderen großen Gebäuden finden sich bisher kaum Anlagen. Dabei können die Kosten für solare Wärme gerade bei Großanlagen deutlich gesenkt werden. Das Interesse an solchen Anlagen ist aber gering, da die Einsparungen dem Mieter zugute kommen, die (Investitions-) Kosten jedoch größtenteils vom Vermieter getragen werden müssen. Für den Vermieter rentieren sich die Anlagen vor allem langfristig, weil niedrigere und vorhersagbare Nebenkosten die Vermietbarkeit verbessern.

Kühlen mit Wärme aus Sonnenkollektoren

Die Wärme, die ein Sonnenkollektor bereitstellt, lässt sich auch zum Antrieb einer Klimaanlage nutzen. Da der Bedarf an Raumkühlung vor allem dann groß ist, wenn die Sonne am stärksten scheint, wird der Kollektor in Kombination mit einer Kältemaschine besonders gut ausgenutzt. Damit lassen sich fossile Energieträger einsparen – konventionelle Klimaanlagen arbeiten häufig mit Strom oder Gas. Der Wunsch nach höherem Wohn-

komfort und veränderte Bauweisen mit größeren Glasfassaden führen zu einem steigenden Bedarf an umweltverträglicher Klimatisierung. Besonders in südlichen Ländern, in denen der Stromverbrauch durch elektrische Kompressionskältemaschinen zu Spitzenlastzeiten die Netze schon heute an ihre Leistungsgrenzen zwingt, stellen diese Systeme eine verlässliche Alternative dar.

Bei der solaren Kühlung wird zwischen zwei Klassen unterschieden. Bei der ersten treibt solare Wärme einen Absorptionskälteprozess an. Da die am Kälteprozess teilhabenden Flüssigkeiten nicht mit der Atmosphäre in Kontakt treten, spricht man vom **geschlossenen Verfahren**.

Im Gegensatz dazu steht im **offenen Verfahren** das Kältemittel Wasser direkt mit der Atmosphäre im Kontakt. Beim so genannten Desiccant-Verfahren wird dem Zuluftstrom einer Lüftungsanlage durch ein Trockenmittel Luftfeuchtigkeit entzogen. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Kiesel-Gel, wie es auch in Verpackungen feuchteempfindlicher Produkte zu finden ist. Dies ist in der Regel auf einer porösen Walze aufgebracht, die Feuchtigkeit aufnimmt (adsorbiert). Durch Rotation wird ein Teil der Walze ständig mit einem solarerwärmten Abluftstrom aufgeheizt, wodurch die Feuchtigkeit wieder an die Umgebung abgegeben wird (siehe Grafik "Kühlung nach dem offenen Verfahren").

Während der Trocknung steigt die Temperatur der Zuluft zunächst an, bevor die Zuluft über eine zweite Walze wieder auf Umgebungstemperatur abgekühlt wird. Durch die Verdunstung von Wasser im Zuluftstrom wird dann eine weitere Abkühlung auf das gewünschte Niveau erzielt. Aktuelle Forschungen konzentrieren sich auf neuartige feste, aber auch flüssige Trockenmittel und Evaporationstechniken, bei denen der Zuluftstrom nicht mehr direkt befeuchtet werden muss.

Beim geschlossenen Verfahren werden Temperaturen von mindestens 80 °C benötigt. Beim offenen Verfahren reichen je nach Trockenmittel auch geringere Temperaturen aus.

Die Technologien zur thermischen Klimatisierung stecken vielfach noch in den Kinderschuhen. Auf dem Markt sind bisher fast ausschließlich große Anlagen mit Kälteleistungen von über 50 bis 100 Kilowatt, die zur Klimatisierung von Kaufhäusern, Bürogebäuden oder Kongresszentren geeignet sind. Kleinere Anlagen für Einfamilienhäuser oder Dachgeschosse mit Kühlleistungen von einigen wenigen Kilowatt werden gerade erst angeboten. Diese Anlagen erschließen ein ganz neues Marktsegment. Denn Sonnenkollektoren zur Warmwassererzeugung und Heizungsunterstützung auf kleineren Gebäuden liefern im Sommer oft zu viel Wärme. Diese Wärme zur Klimatisierung und damit Steigerung des Wohnkomforts zu nutzen stellt eine viel versprechende Zukunftsanwendung dar.

Im Leuchtturmprojekt "Solare Nahwärmeversorgung mit Langzeitspeicher" der Stadtwerke Crailsheim wurden insgesamt 5.000 m² Kollektorfläche auf einem ökologischen Lärmschutzwall installiert.

In den meisten Fällen muss der Betreiber einer solar unterstützten Klimaanlage gegenwärtig noch draufzahlen. Betrachtet man alle anfallenden Kosten, ist die solare Variante momentan etwa 10 bis 40 % teurer als eine konventionelle Anlage. Doch bei solar unterstützten Klimaanlagen gibt es ein großes Potenzial für technische Verbesserungen und Kostensenkungen. Dies hat sich bei den bisher umgesetzten, größeren und noch nicht für den Einzelhaushalt ausgelegten Anlagen gezeigt. Vor allem bei der komplexen, aufeinander abgestimmten Steuerung von Sonnenkollektor und Kälteanlage bestehen große Verbesserungschancen. Damit könnte die solare Kühlung in den nächsten Jahren auch bei kleineren Häusern oder Dachgeschossen eine größere Verbreitung erlangen.

Der größte Teil des Marktes wird dabei jedoch nicht in Deutschland, sondern in südlichen, sonnenreichen Ländern mit hohem Klimatisierungsbedarf liegen.

Perspektiven

Langfristig kann solare Wärme in erheblichem Maße zu einer nachhaltigen Energieversorgung Deutschlands beitragen. Auf den Dächern von Gebäuden ist Platz für 800 km² Kollektoren – bisher sind 9,6 km² installiert. Weitere Installationsflächen gibt es an Südfassaden, über Parkplätzen oder an Straßenböschungen. Insgesamt können bis zu 1.300 km² Kollektoren installiert werden, wobei schon berücksichtigt ist, dass ein Teil der Dachflächen für die Nutzung von Solarzellen zur Stromerzeugung (Photovoltaik) reserviert bleiben muss. Mit dieser Kollektorfläche könnte rechnerisch etwa die Hälfte des momentanen Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser gedeckt werden. Heute liegt der Beitrag solarer Wärme am gesamten Wärmebedarf Deutschlands noch bei 0,3 %.

Um solare Wärme zu einem Standbein der Energieversorgung zu machen, genügt es nicht, jedes Dach mit Kollektoren zu belegen und einen Solarspeicher in jeden Keller zu stellen. Vielmehr müssen viele Gebäude über ein Nahwärmenetz miteinander verbunden und an einen großen gemeinsamen Speicher angeschlossen werden. Nur so kann zu vertretbaren Kosten Sommersonnenwärme bis in den Winter gespeichert werden.

Der **Aufbau von Nahwärmenetzen** ist eine entscheidende Voraussetzung für die umfassende Nutzung solarer Wärme (siehe S. 60). Auch zur kostengünstigen Nutzung von Holzhackschnitzeln, Stroh oder Geothermie kann Nahwärme in erheblichem Maße beitragen.

Mit Architektur die Sonne "passiv" nutzen

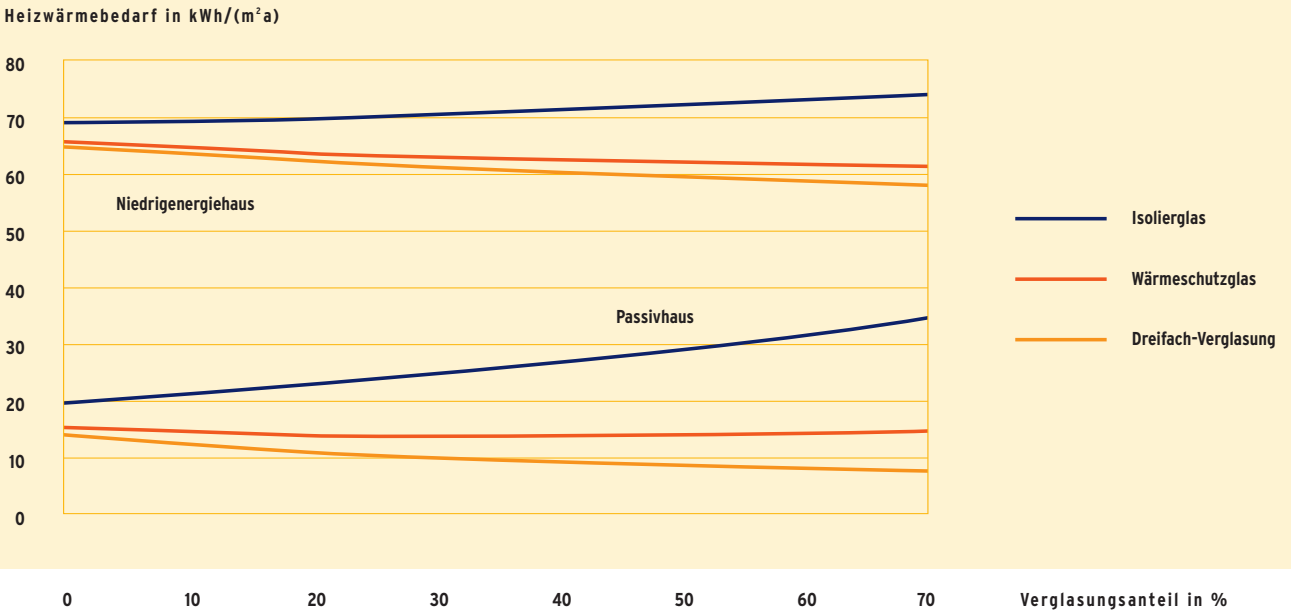
Passive Solarnutzung – die Architektur macht's möglich

Im Gegensatz zu Solarkollektoren, bei denen die eingefangene Wärme durch Pumpen zum gewünschten Ort transportiert wird, arbeitet die passive Nutzung von Sonnenenergie ohne aktive Technik wie Pumpen. Das Paradebeispiel hierfür sind unverschattete Südfenster, durch die im Winter die Strahlen der tiefstehenden Sonne in das Haus eindringen und es erwärmen: Das Gebäude selbst wird zu einer Art Sonnenkollektor. Dabei dringt Licht als energiereiche, kurzwellige Strahlung durch die Fenster und wird im Inneren des Gebäudes in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt. Für diese ist Glas jedoch kaum durchlässig – der Raum heizt sich auf. Um einer Überhitzung im Sommer vorzubeugen, sollten die Fenster daher von außen verschattet werden können.

Tagsüber kann Solarstrahlung erheblich zur Beheizung eines Hauses beitragen. Je besser das Haus bereits wärmegedämmt ist, desto stärker sind die Auswirkungen. Während der Nachtstunden geht dagegen auch durch die besten Fenster mehr Wärme verloren als durch eine gut gedämmte Wand. Ob sich bei einer Vergrößerung der Fensterfläche insgesamt eine positive oder eine negative Energiebilanz ergibt, hängt stark von der Qualität der Verglasung ab (Grafik "Südfensterfläche und Heizwärmebedarf"). Eine Vergrößerung der Südfensterfläche wirkt sich nicht immer günstig auf den Heizwärmebedarf aus. Insbesondere bei Passivhäusern können Verbesserungen nur mit erstklassiger Verglasung mit Dreifachwärmeschutzfenstern erreicht werden.

→ Südfensterfläche und Heizwärmebedarf

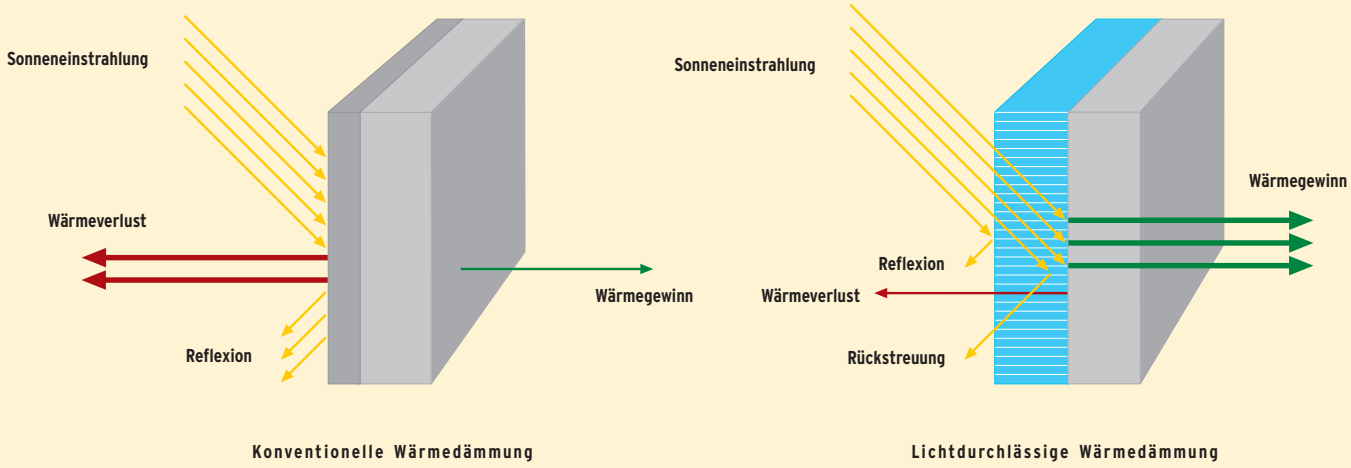
Quelle: IWU 1997



Fenster als Heizung: Bei guter Verglasung (Dreifach-Verglasung) sinkt der Heizwärmebedarf mit steigendem Anteil von Südfenstern.

→ Transparente Wärmedämmung

Quelle: FhG-ISE



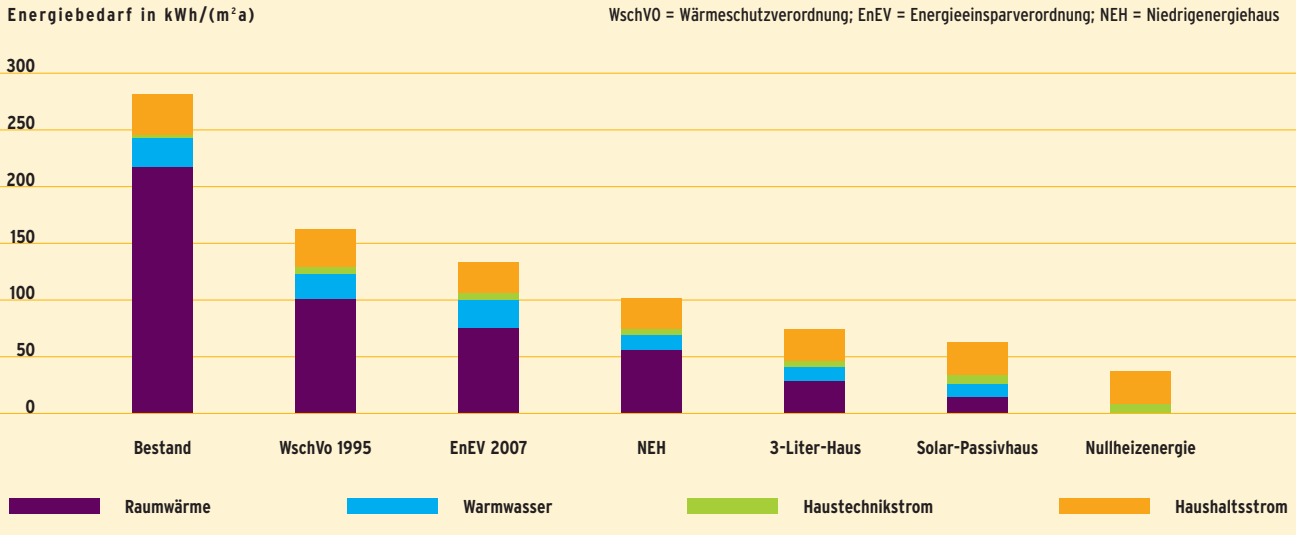
Funktionsweise der lichtdurchlässigen, transparenten Wärmedämmung

Zur passiven Nutzung zählen aber auch lichtdurchlässige Teile der äußeren Gebäudehülle wie Wintergärten oder die transparente Wärmedämmung (TWD). Transparente Wärmedämmung kann an den Fassaden von Alt- oder Neubauten angebracht werden. Sie besteht aus einer lichtdurchlässigen, aber gut wärmedämmenden Schicht – beispielsweise aus feinen Glas- oder Kunststoffröhrchen (Grafik "Transparente Wärmedämmung"). Das einfallende Licht durchquert die transparente Dämmschicht und wird auf der tragenden Wand absorbiert. Dabei erwärmt sich die Wand. Da sich diese Wärme bereits hinter der Dämmschicht der Hauswand befindet, kann sie nicht mehr nach außen entweichen und heizt so – mit zeitlicher Verzögerung – den dahinter liegenden Wohnraum auf. Im Sommer kann als Schutz gegen Überhitzung ein Verschattungssystem notwendig werden.

Der Nutzen einer transparenten Wärmedämmung hängt von der Himmelsrichtung der TWD-Wand, von der Qualität und Ausrichtung der übrigen transparenten Bauteile (Fenster) sowie dem Aufbau der Wand hinter der TWD ab. Dementsprechend darf auf eine sorgfältige Planung keinesfalls verzichtet werden. Aufgabe des

→ Gebäudeenergiekennwerte

Quelle: aktualisiert nach Luther 2001



Energiekennwerte für verschiedene Wärmedämmstandards am Beispiel eines Einfamilienhauses

Hochmoderne Nullenergiehäuser sind so konstruiert, dass weder Brennstoff noch Heizstrom benötigt werden.

Architekten ist es, die Gebäude so zu konstruieren, dass die passiven solaren Gewinne möglichst hoch sind, keine sommerliche Überhitzung eintritt und nachts die zusätzlichen Verluste durch vergrößerte Fensterflächen in vertretbaren Grenzen gehalten werden. Passive Solarnutzung ist wie keine andere Technologie auf die ganzheitliche Betrachtung der Gebäudestruktur und Energieversorgung angewiesen (Grafik “Gebäudeenergiekennwerte”).

Mehrkosten des Wärmeschutzes

Je geringer der Heizwärmebedarf eines Neubaus ist, desto geringer ist die jährliche Heizkostenrechnung. Dem stehen Mehrkosten beim Neubau des Gebäudes gegenüber (Abbildung “Mehrkosten”). Für Passivhäuser rechnet man mit maximal 10 % zusätzlichen Investitionskosten gegenüber einem Standardhaus nach EnEV 2007. Dies entspricht Mehrkosten von rund 150 Euro/m² Nutzfläche. Bei guter Planung können die zusätzlichen Kosten aber deutlich geringer ausfallen und bei Verwendung von Förderprogrammen auf das Niveau von Standardgebäuden sinken. Dafür bieten sie einen zuverlässigen Schutz gegenüber zukünftigen Energiepreissprüngen und können selbst im Winter notfalls ganz ohne Heizung auskommen.

Wenn man die Wärmedämmung noch verstärkt und eine Solaranlage mit sehr großem Speicher im Inneren des Hauses installiert, braucht das Gebäude überhaupt keinen Brennstoff oder Heizstrom von außen mehr. Dann spricht man vom “Nullenergiehaus”.

Noch wichtiger als hohe Standards bei Neubauten sind Verbesserungen im Altbaubestand. Der Grund: Weniger als 1 % des Wohnungsbestandes wird jedes Jahr erneuert. Darum sollte bei ohnehin fälligen Sanierungsarbeiten an den Fassaden ein zusätzlicher Wärmeschutz aufgebracht werden. Dann sind die Mehrkosten gering und amortisieren sich nach kurzer Zeit. Eine ähnlich günstige Gelegenheit ergibt sich sonst erst beim nächsten Renovierungszyklus nach einigen Jahrzehnten.

Infos zu Sonnenkollektoren

- → **Bundesverband Solarwirtschaft: www.solarwirtschaft.de**
- → **European Solar Thermal Industry: www.estif.org**
- → **Große Anlagen und saisonale Speicherung: www.solarthermie2000.de**

Infos zu passiver Solarnutzung

- → **Passivhaus Institut: www.passiv.de**
- → **BINE-Informationsdienst zu Energietechnologien: www.bine.info**
- → **Institut Wohnen und Umwelt: www.iwu.de**
- → **Fraunhofer-Institut für Bauphysik: www.ibp.fhg.de**

BIOMASSE – DER DAUERBRENNER FÜR WÄRME UND STROM

Die Fakten:

- **Nahezu 7 % des deutschen Endenergiebedarfs im Jahr 2008 stammen aus Biomasse. 210 Holzheizkraftwerke, knapp 4.100 Biogasanlagen und 9 Millionen kleine Biomasseheizungen stellen klimafreundlich Strom und Wärme bereit.**
- **Die Wärmebereitstellung aus Holz und anderen festen Bioenergieträgern gewinnt angesichts steigender Öl- und Gaspreise deutlich an Bedeutung.**
- **Biogasanlagen schaffen ein neues wirtschaftliches Standbein für die Landwirtschaft. Besonders die Güllenutzung leistet einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz.**
- **Biogas-Mikronetze und die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität schaffen neue Optionen für den Betrieb von Biogasanlagen.**
- **Das Ausbaupotenzial der Biomasse in Deutschland liegt bei rund 10 % des heutigen Energierohstoffbedarfs.**

Holz-Heizkraftwerk, Biogas-Anlage und Holzfeuerung

Die Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von Strom und Wärme ist eine besonders unter Klimagesichtspunkten attraktive Form der Energiewandlung. Denn für die Bildung von Biomasse wird der Atmosphäre zunächst das Treibhausgas CO_2 entzogen; der Kohlenstoff wird in der Biomasse gebunden. Später wird er wieder in die Atmosphäre abgegeben – etwa bei der Verbrennung oder der Verrottung der Biomasse. Wird die Biomasse daher energetisch genutzt, wird nur das CO_2 freigesetzt, das zuvor beim Wachstum der Pflanzen aus der Atmosphäre entnommen wurde.

Biomasse ist nicht gleich Biomasse. Organische Abfälle, Holz, Gülle, auch Getreide, Mais oder andere Stoffe pflanzlichen und tierischen Ursprungs und deren Neben- und Folgeprodukte können für eine klimaverträgliche Energiebereitstellung herangezogen werden.

Zu den wichtigsten biogenen Brennstoffen zählen sicherlich Holz und Holzreste, die als Reststoff aus Waldduchforstungen, Sägereien oder als Altholz vorliegen. Schnellwachsende Hölzer, wie Pappeln oder Weiden können in so genannten Kurzumtriebsplantagen angebaut und nach wenigen Jahren geerntet werden. Schilfgras (Miscanthus) ist ein potenziell sehr ertragreicher nachwachsender Rohstoff, setzt aber Ackerböden von hoher Qualität mit guter Wasserversorgung voraus. Reststroh, aber auch spezielle Getreide-Ganzpflanzen wie der Weizen-Roggen-Hybrid Triticale eignen sich ebenfalls zur Energiebereitstellung. Zucker- und Stärke-

pflanzen, beispielsweise Mais oder Zuckerrübe, können zur Herstellung von Bioalkohol verwendet werden. Zur Biomasse zählen auch ölhaltige Pflanzen, die durch Pressung und nachfolgende Verarbeitung in flüssige Energieträger umgewandelt werden (siehe Kapitel “Biokraftstoffe”).

Organische Reststoffe eignen sich ebenfalls als Energielieferant. Gülle, Bioabfall, Klärschlamm und kommunale Abwässer oder Speisereste können in ein energiereiches Biogas verwandelt werden. Auch aus Mülldeponien tritt Biogas aus.

Die älteste Nutzungsart: Feuerungen

Die älteste und einfachste Art der energetischen Nutzung ist die Verfeuerung der Biomasse. Um eine vollständige und emissionsarme Verbrennung zu gewährleisten und Rücksicht auf den Aschegehalt, die Brennstoffzusammensetzung, Form und Partikelgröße der Brennstoffe zu nehmen, wurden für die verschiedenen Größenklassen der Anlagen unterschiedliche Feuerungstypen entwickelt, die sich im Wesentlichen durch die Art der Brennstoffaufbereitung und -zufuhr unterscheiden.

Die heutige Nutzung biogener Feststoffe in Deutschland geschieht überwiegend in Kleinstanlagen unter 15 Kilowatt oder Kleinanlagen. Eine automatische Brennstoffbeschickung und Feuerungsregelungen haben den Bedienungskomfort erhöht. Kleinanlagen unterliegen dabei auch den Grenzwerten des Bundesimmissionsschutzgesetzes.

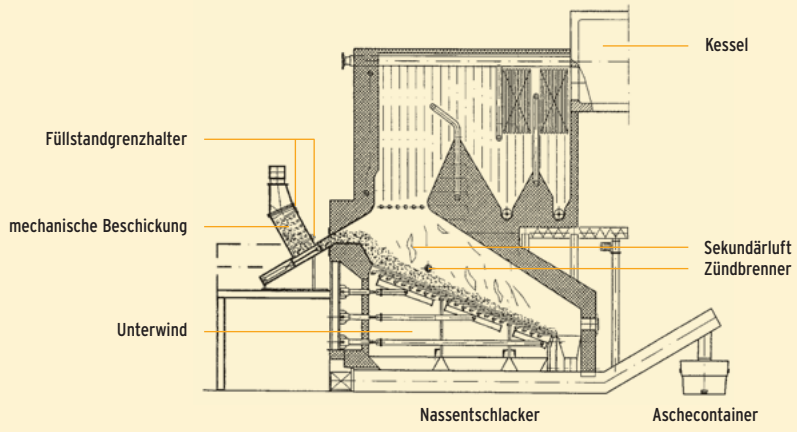
Einen besonderen Aufschwung erleben Heizungen auf Basis von Holzpellets. Holzpellets sind kleine Presslinge aus naturbelassenem Holz, meist aus Säge- oder Hobelspänen. Sie können genau wie Heizöl im Tankwagen angeliefert oder in Säcken gekauft werden. Pellets können in Kaminöfen genauso wie in großen, vollautomatischen und emissionsarmen Zentralheizungen verfeuert werden. Mit Förderschnecken oder Saugvorrichtungen werden die Pellets automatisch aus einem Speicherbehälter geholt und in die Brennkammer eingebracht. Der notwendige Lagerraum für den Brennstoff ist bei Pellets kaum größer als bei einer Ölzentralheizung. Wärmeerzeugung ist aber nicht nur auf Kleinanlagen begrenzt. Mit Holzfeuerungen können auch Nah- und Fernwärmenetze mit Wärme versorgt werden (siehe S. 60). In Österreich, das seit langem Biomasse systematisch fördert, gibt es viele hundert mit Biomasse befeuerte Fernheizwerke. In diesen größeren Feuerungen lohnt auch ein höherer technischer Optimierungsaufwand.

Verbessert wurden die heutigen modernen Feuerungen sowohl im Bereich der Wirkungsgrade wie auch der Emissionen. Die Wirkungsgrade lassen sich durch die Kondensation der Rauchgase – dabei wird die Energie der Umwandlung von Wasserdampf in flüssiges Wasser genutzt – und durch die Vortrocknung der Biomasse erheblich steigern. Die Abgaswerte werden durch einen kontinuierlichen Verbrennungsvorgang und durch eine effiziente Staubabscheidung verbessert.

Gerade bei den kleinen Anlagen konnten die Emissionen von Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen in den vergangenen Jahren deutlich gesenkt werden. Bei kleinen, nicht-automatischen Feuerungsanlagen wie offenen Kaminen oder Kaminöfen ist darauf zu achten, dass die Geräte eine optimierte Brennkammer haben; hier ist auch die Bedienung von großer Bedeutung. Bei sorgfältiger Befeuerung mit trockenem Holz lassen sich die Staubemissionen um ein Vielfaches senken.

→ **Biomassefeuerung**

Quelle: Flaig 1998



Die Rostfeuerung ist ein Beispiel für eine flexibel einsetzbare Biomassefeuerung. Durch die Fortbewegungsgeschwindigkeit des Brenngutes und die Luftmenge kann die Feuerung präzise gesteuert werden.

Hackschnitzellager in Niedersachsen. Ein Kilogramm trockenes Holz enthält so viel Energie wie ein halber Liter Heizöl.

Sichtprüfung des Brennvorgangs in einem Biomasse-Heizkraftwerk

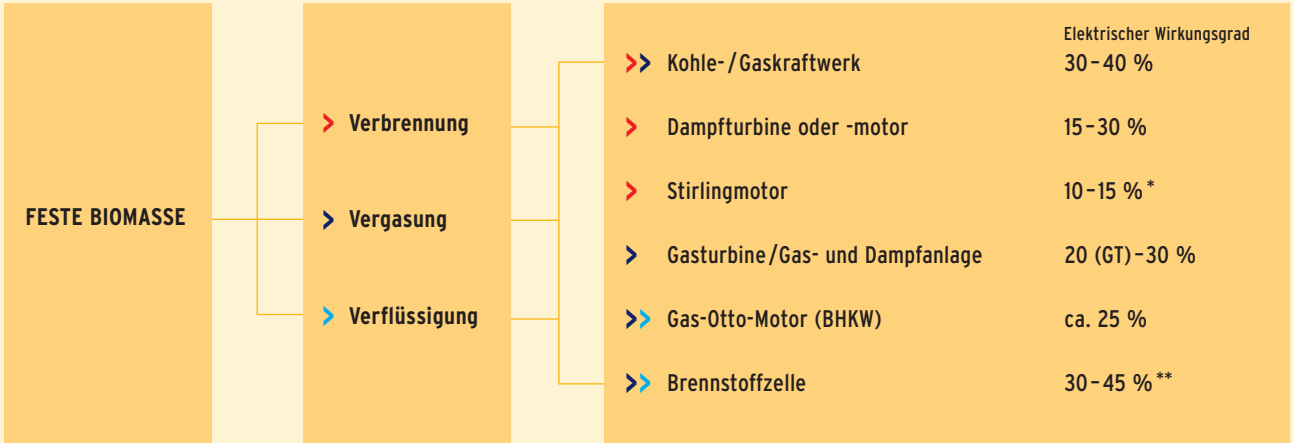
Strom aus Biomasse

Das Interesse an der Verstromung von Biomasse ist seit der Verabschiedung der Biomasse-Verordnung und dem novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2004 sprunghaft angestiegen. Allein die Stromerzeugung aus Holz und anderen biogenen Festbrennstoffen hat sich in den letzten Jahren auf 15,4 Mrd. kWh vervielfacht. 210 solcher Biomasse-Kraftwerke und Heizkraftwerke sind in Deutschland in Betrieb. Als Brennstoff werden in den Kraftwerken vor allem Altholz, aber auch Industrieresthölzer, Sägenebenprodukte und Waldrestholz eingesetzt.

In heutigen Holz-Kraftwerken wird die Biomasse verbrannt und in der Regel mit der Hitze Dampf erzeugt. Dieser Dampf treibt dann eine Turbine oder einen Motor an (siehe Grafik “Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse”). Besonders effizient ist es, die verbleibende Wärme nicht ungenutzt an die Umgebung abzugeben, sondern zur Beheizung von Gebäuden oder für Trocknungsprozesse zu verwenden. Das nennt man Kraft-Wärme-Kopplung (siehe S. 58). Diese Form der hocheffizienten Biomassenutzung wird durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz besonders gefördert.

Da die Stromwirkungsgrade der heutigen Kraftwerkstechnologien besonders in kleinen Anlagen noch unbefriedigend sind, werden neue Technologien entwickelt. Hierzu gehört der Stirlingmotor, der im Unterschied zu Dampfturbinen auch im Leistungsbereich unter 1 MW noch hohe Strom- und Wärmeausbeuten aufweist. Die

→ Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse



Verschiedene Technologien stehen zur Stromerzeugung aus Biomasse bereit (* kleinere Leistungsklasse als Dampfturbine; ** je nach Brennstoffzellentyp).

Biomasse-Kraftwerke verstromen Holz und andere feste Bioenergieträger

"Energiestäbchen" – Pellets aus Biomasse

Kommerzialisierung beginnt allerdings erst allmählich (Grafik "Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse"). Weiter ist da schon die ORC-Technik ("Organic-Rankine-Cycle"), die sich besonders für Wärmequellen auf niedrigem Temperaturniveau eignet. Bei diesem Prozess wird die Wärme der Feuerung – oder auch jeder anderen Wärmequelle, beispielsweise Erdwärme – nicht zur Erzeugung von Wasserdampf für eine Dampfturbine genutzt. Stattdessen wird ein organisches Lösungsmittel, wie Toluol, Pentan oder Ammoniak verdampft, um damit eine Turbine anzutreiben. Die erste biomassebefeuerte ORC-Anlage in Deutschland wurde 2002 errichtet, mittlerweile (Ende 2007) setzen 20 % der in Betrieb befindlichen Kraftwerke auf die ORC-Technik.

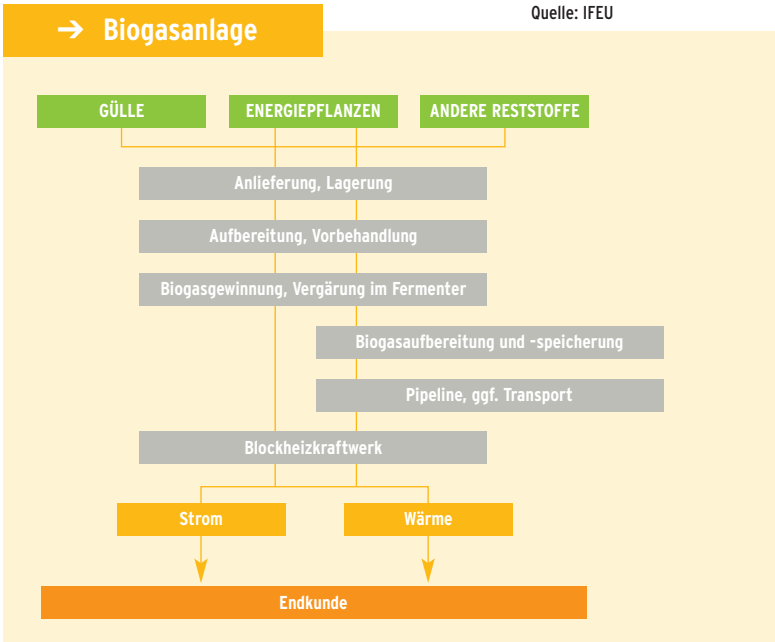
Eine vielversprechende Alternative zur Verbrennung ist die Vergasung von Biomasse. Dazu wird sie bei hohen Temperaturen zersetzt und in ein Gas umgewandelt. Dieses Gas wird dann abgekühlt, gereinigt und in einem Motor-Blockheizkraftwerk (BHKW) oder einer Turbine verbrannt. Auch die zukünftige Nutzung von Biomasse in Brennstoffzellen, von welchen auch bei kleinen Leistungseinheiten noch hohe Stromausbeuten erwartet werden, wird mit vergastem Holz möglich. Holzvergaser sind prinzipiell nichts Neues. Sie wurden schon nach dem Krieg mangels motorschonenderer Kraftstoffe zum Antrieb von LKW verwendet. Das besondere Kunststück ist, auch bei wechselnden Brennstoffqualitäten ein hochwertiges und teerarmes Gas herzustellen, das die Motoren dauerhaft vertragen. Neu entwickelte Holzvergaser-Pilotanlagen mit angeschlossenem BHKW werden derzeit im Dauerbetrieb erprobt.

Biogas - Bakterien am Werk

Auch Biogas kann zur Stromerzeugung oder Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden. Biogas entsteht bei der Zersetzung von organischer Materie durch spezielle Methanbakterien. Dieser Prozess heißt Vergärung. Zwei wesentliche Voraussetzungen müssen für die Bildung eines energiereichen Gases erfüllt sein: Es müssen "anaerobe Bedingungen" herrschen, Sauerstoff muss also ausgeschlossen sein. Außerdem müssen die Temperaturen im Biogasreaktor den vorhandenen Bakterien angepasst sein. Die meisten Biogasanlagen arbeiten bei Temperaturen zwischen 30 und 37 °C.

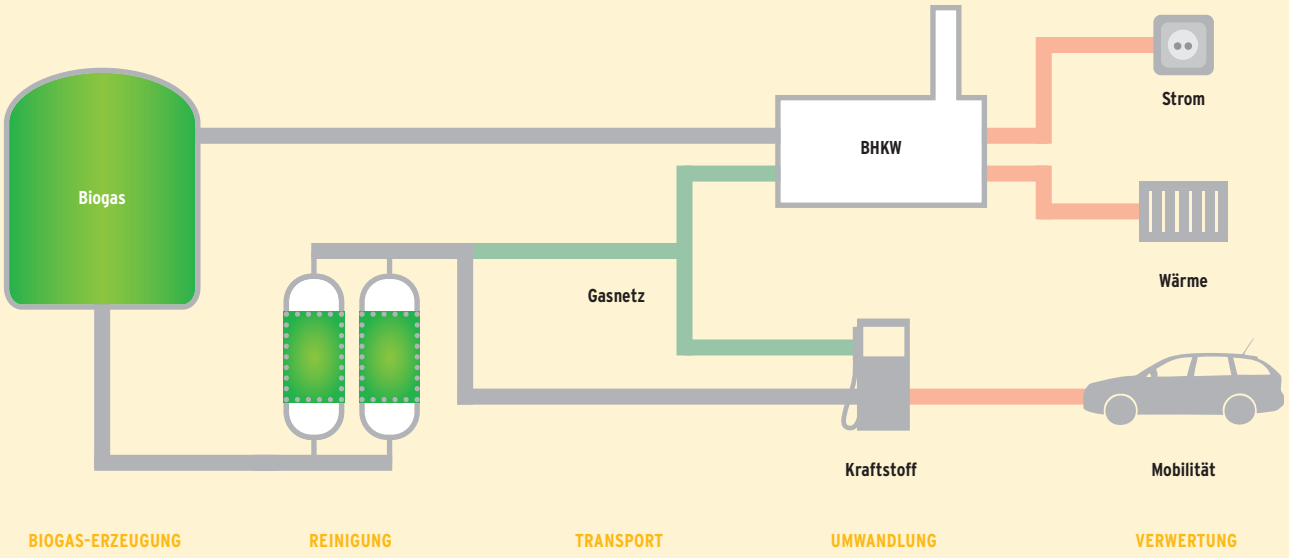
Die Bakterien zersetzen die organische Materie in mehreren Stufen. Endpunkte der Zersetzungskette sind die Gase Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2). Hundert Kubikmeter Biogas entstehen aus etwa einer Tonne Bioabfall, den täglichen Exkrementen von 110 Rindern,

Quelle: IFEU



Von der Gülle zur nutzbaren Energie – schematische Darstellung der Verfahrensschritte

→ Biogasaufbereitung



Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz

13.000 Hühnern oder aus etwa einer halben Tonne Silomais. Der energetisch nutzbare Methananteil im Biogas ist beim Silomais am niedrigsten, da er vorwiegend Kohlenhydrate enthält. Die Fettanteile in den Exkrementen oder im Bioabfall ergeben höhere Methangehalte, die um die 60 % liegen.

Bereits 1948 entstand die erste deutsche Biogasanlage im Odenwald. Seitdem hat sich die Verfahrenstechnik stetig verbessert. Die Kernkomponenten sind jedoch gleichgeblieben (Grafik "Biogasanlage"): In der Aufbereitungsstufe wird die organische Masse zerkleinert und von Störstoffen befreit. Das Herzstück der Anlage ist der Methanreaktor, in dem die eigentliche bakterielle Zersetzung stattfindet. Je nach Größe der Anlage kann dieser Reaktor aus Beton, Kunststoff oder Stahl gefertigt werden. Für landwirtschaftliche Kleinanlagen in Entwicklungsländern werden die Faulräume oft im Boden versenkt gemauert. Das organische Substrat verweilt zwischen zehn und 35 Tagen im Reaktor, bevor der Gärrest ausgeschleust und beispielsweise als Düngemittel oder Kompost weiterverarbeitet wird. Anschließend wird das erzeugte Biogas gegebenenfalls gereinigt und entschwefelt.

Mit einem Heizwert von circa 6 kWh entspricht ein Kubikmeter Biogas 0,6 Litern Heizöl oder 0,6 m^3 Erdgas. In Deutschland wird das im Reaktor entstandene Biogas nahezu ausschließlich in Blockheizkraftwerken (BHKW) genutzt. Das BHKW deckt zunächst den Eigenbedarf der Anlage an Strom für Rührwerke und Steuerungen und den Eigenbedarf an Wärme für die Beheizung des Reaktors.

Das Biogas kann aber auch gereinigt, aufbereitet und dann in ein Erdgasnetz eingespeist werden. Dazu muss das im Biogas enthaltene Kohlendioxid abgetrennt und das Gas mit einem Kompressor auf das Druckniveau des Erdgasnetzes gebracht werden. Diese Aufbereitung kostet zusätzliche Energie. Der Vorteil liegt aber darin, dass das Biogas an anderer Stelle aus dem Gasnetz entnommen werden kann, wo ein kontinuierlicher Wärmebedarf gegeben ist und das Gas daher mit hohen Wirkungsgraden genutzt werden kann. Mit der neuen Gasnetzzugangsverordnung werden die gesetzlichen Voraussetzungen für eine solche Einspeisung geschaffen.

Wenn es potenzielle Wärmeverbraucher in der Nähe einer Biogasanlage gibt, kann eine Gasleitung gebaut werden, durch die das Biogas unaufbereitet weiter geleitet wird. Ein solches "Biogas-Mikronetz" wird durch das Marktanreizprogramm gefördert.

Biogasanlagen haben für Landwirte einen mehrfachen Nutzen: Der größte wirtschaftliche Vorteil entsteht durch den im BHKW erzeugten Strom, der in das öffentliche Stromnetz eingespeist und gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz vergütet wird. Die Wärme wird zur Beheizung von Gebäuden und Stallungen verwendet. Bei größeren Anlagen ist auch die Verteilung der Wärme mit einem Nahwärmenetz möglich (siehe S. 60). Außerdem wird die Gülle als Düngemittel aufgewertet und die Geruchsbelästigung bei der Ausbringung reduziert.

Die Vergärung der Gülle hat einen mehrfachen Klimanutzen: Die vergorene Gülle emittiert weniger Methan – ein hochpotentes Treibhausgas – bei der Lagerung als die unvergorene. Strom und Wärme aus Biogasanlagen vermeiden zudem die Verbrennung fossiler Energieträger.

Heute werden in Biogasanlagen vor allem tierische Exkremente und nachwachsende Rohstoffe (insbesondere Mais, aber auch Grassilage und Getreide) sowie Bioabfälle eingesetzt.

Kosten

Die Vielfältigkeit der biogenen Einsatzstoffe spiegelt sich auch in den Kosten der Energiebereitstellung wider. Ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen sind in der Regel die Bereitstellungskosten des Brennstoffs. Diese Kosten können "negativ" sein, wenn zum Beispiel Landwirte oder Lebensmittelfabriken Deponiekosten oder Kosten für die Entsorgung von Reststoffen vermeiden. Dann kann der Anlagenbetreiber für die Annahme der Reststoffe eine Gebühr verlangen. Die Beschaffungskosten können aber auch hoch sein; sie erreichen beim Einkauf von Getreide-Ganzpflanzen bis zu 160 Euro je Tonne. Gestiegene Weltmarktpreise für Getreide und Preissteigerungen bei den landwirtschaftlichen Rohstoffen haben auch die Einsatzstoffe für Biogasanlagen verteuert. Viele Biogasanlagen werden heute sowohl mit Reststoffen als auch landwirtschaftlichen Rohstoffen betrieben.

Die biogene Wärmebereitstellung kann unter günstigen Rahmenbedingungen niedrigere Wärmegestehungskosten aufweisen als Öl- oder Gaskessel. Dies hängt vor allem mit den rapide gestiegenen Gas- und Ölpreisen zusammen. Während beispielsweise Holzpellets unter 4 Cent pro Kilowattstunde kosten, liegen die Gas- und Ölpreise bei 8 bis 9 Cent pro Kilowattstunde (Stand August 2008). Rechnet man die Investitions- und Wartungskosten hinzu – die bei Holzheizungen deutlich über fossilen Kesseln liegen –, sind Holzpellets – und erst recht Scheitholz oder Hackschnitzel – dennoch günstiger als Gas oder Öl.

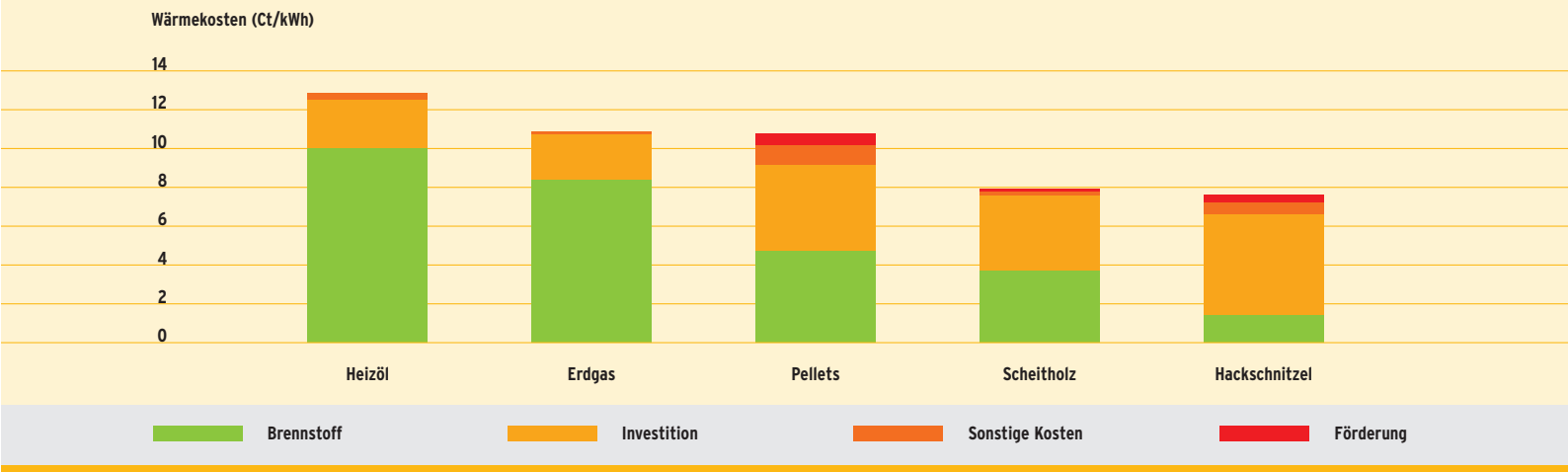
Seit Sommer 2008 arbeitet am einstigen Braunkohlestandort Lauchhammer ein Biogaspark. Verarbeitet wird Mais-Silage.

Die Kosten der Strom- und Wärmeerzeugung von Biogasanlagen hängen in starkem Maße von der Anlagengröße, dem Kofermentationsanteil und den eventuellen Entsorgungsgutschriften, der Gasausbeute, dem Stromeigenbedarf, dem externen Wärmebedarf und anderen Neben-Nutzen wie einer möglichen Düngewertverbesserung ab. Die Bandbreite liegt zwischen 12 und 28 Cent pro Kilowattstunde. Durch die Vergütungssätze des Erneuerbare-Energien-Gesetzes sind viele landwirtschaftliche Anlagen wirtschaftlich. Zudem können Landwirte durch Eigenleistung viel Geld beim Bau der Anlage sparen. Wichtig ist es, die Anlagen maximal auszulasten. So werden in Dänemark zur besseren Auslastung und wegen der Kostendegression bei größeren Anlagen bevorzugt Gemeinschaftsanlagen mehrerer Landwirte gebaut.

Auch die Stromerzeugungskosten aus fester Biomasse schwanken stark in Abhängigkeit vom Brennstoff. Wäh-

→ Wirtschaftlichkeit

Quelle: verändert nach CARMEN/ZSW 2008



Kostenvergleich verschiedener kleinerer Heizungssysteme. Annahme für Öl- und Gaspreis: 8,5 bzw. 7,5 Ct/kWh

Biogasanlage: Auf der Basis von Rindergülle, Mais-Silage und Roggen wird eine Leistung von 500 kW_{el} erzeugt.

rend ein großes Altholzkraftwerk auf rund 8 Cent pro Kilowattstunde Strom kommt, kostet die Elektrizitätsbereitstellung aus einem kleinen Kraftwerk mit naturbelassenem Holz rund 20 Cent.

Deponiegas fällt kontinuierlich und vorhersagbar an. Es muss ohnehin durch ein Leitungssystem erfasst werden. Bei ordnungsgemäßer Auslegung der Anlage ist daher ein wirtschaftlicher Betrieb gewährleistet. Klärgasanlagen sind wirtschaftlich, wenn ohnehin ein Faulturm (Biogasreaktor für den Klärschlamm) vorhanden ist.

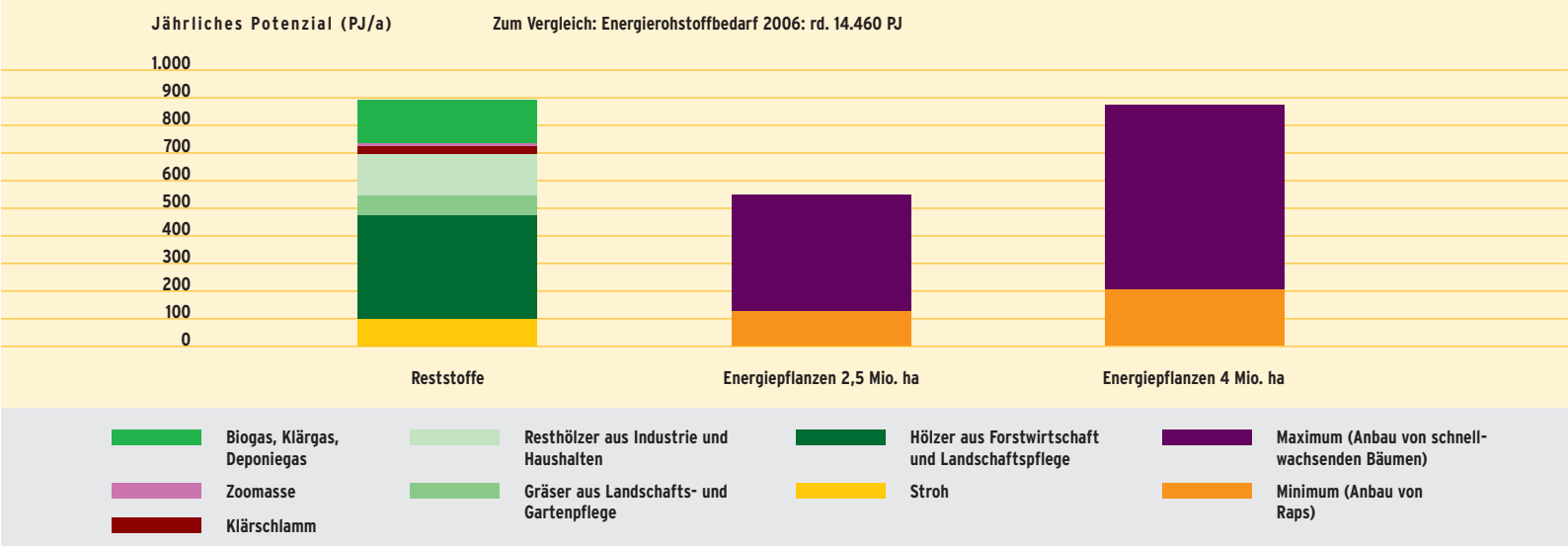
Potenziale

Holz leistet heute den mit Abstand größten Beitrag zur energetischen Nutzung von Biomasse. Dies wird auch in Zukunft so bleiben. Restholz im Wald, das nicht zur stofflichen Verwertung an die Industrie verkauft werden kann, fällt in Form dünner Stämme bei der Durchforstung junger Bestände und dicker Äste und anderer Erntereste beim Fällen von schlagreifen Bäumen an. Weiteres naturbelassenes Holz entsteht als Verschnitt in Sägewerken und in der übrigen holzverarbeitenden Industrie. Hiervon wird allerdings ein großer Teil in der Papier- und Spanplattenindustrie stofflich verwertet, so dass nur der überschüssige Rest energetisch genutzt werden kann. Des weiteren stehen Holzprodukte am Ende ihrer Nutzungsdauer als meist kontaminiertes Altholz zur Verfügung. Auch dieses wird teilweise noch stofflich verwertet. Die Grenze zwischen der stofflichen und energetischen Nutzung ist gleitend und von den jeweils erzielbaren Verkaufspreisen abhängig. Werden die Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Holz voll ausgeschöpft, so ergibt sich allein daraus ein Potenzial von über 150 Mrd. kWh/a. Weitere Potenziale können durch die Nutzung von Stroh, durch Biogasanlagen und durch den gezielten Anbau von Energiepflanzen erschlossen werden.

Stroh wird als Einstreu für die Tierhaltung benötigt und muss außerdem in vielen Gegenden zur Erhaltung der Bodenqualität auf den Acker zurückgeführt werden. Für die energetische Nutzung verbleibt nur ein Anteil von rund einem Drittel des gesamten Strohaufkommens. Stroh ist ein problematischer Brennstoff und wird daher – im Unterschied zu Dänemark – in Deutschland heute kaum genutzt. Für eine zukünftige Nutzung bietet sich

→ Potenzial biogener Brenn- und Kraftstoffe

Quelle: IFEU



Biomasse kann in vielfältiger Form zur Energiegewinnung genutzt werden.

die kostengünstige und effiziente Mitverbrennung in Kohlekraftwerken an.

Das größte Potenzial für die Gewinnung von Biogas ist in der Landwirtschaft zu finden. Derzeit (Ende 2008) werden 1,3 % des deutschen Stromverbrauchs durch Biogas gedeckt, das in rund 4.100 Anlagen produziert wird (Grafik “Biogasanlagen in Deutschland”). Dieser Anteil könnte allein mit Abfällen aus der Landwirtschaft verdoppelt werden.

Neben Rest- und Abfallstoffen bietet sich auch der gezielte Anbau von Biomasse an. Das Potenzial der Energiepflanzen hängt sehr stark davon ab, wie viel Ackerfläche zur Verfügung steht – also davon, wie viel landwirtschaftliche Flächen wir stilllegen, wie wir uns ernähren, wie hoch die Erträge sind, wie viel Ökolandbau wir haben wollen, wie viel Nahrungs- oder Energiepflanzen wir importieren und welche Pflanzen wir anbauen. Allerdings ist es keineswegs selbstverständlich, dass frei werdende Flächen für den Anbau von Energiepflanzen eingesetzt werden. Eine dringend gebotene Extensivierung der Landwirtschaft wäre ebenfalls auf große zusätzliche Flächen angewiesen. Flächen werden auch für die Schaffung von Biotopflächen und andere Erfordernisse des Natur-, Boden- und Gewässerschutzes benötigt.

Seit der Novellierung des EEG 2004 wird in Biogasanlagen verstärkt ackerbaulich erzeugte Biomasse zur Biogaserzeugung eingesetzt, weil es hierfür finanzielle Anreize gibt. Eingesetzt werden insbesondere Mais-, Getreideganzpflanzensilage, Grassilage und Getreide in Form von Körnern.

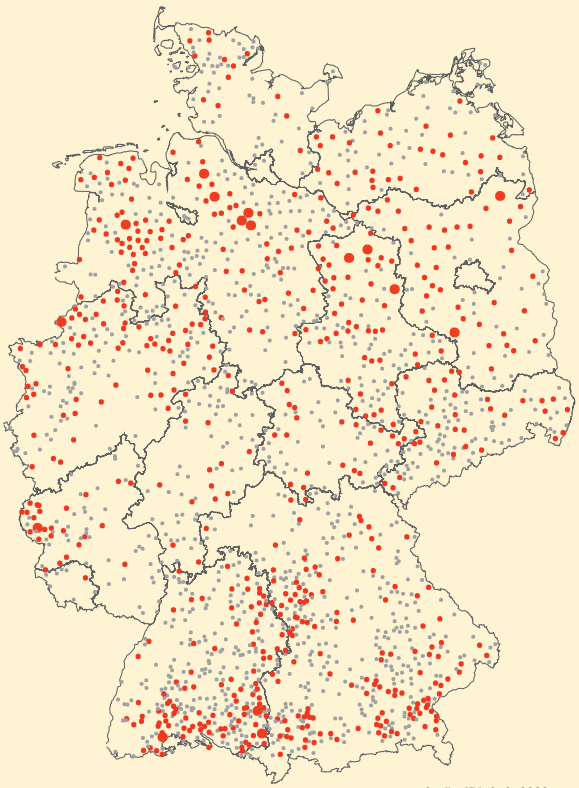
Ausgehend von 2,5 Mio. ha Anbaufläche und den Möglichkeiten der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen könnte unter günstigen Randbedingungen insgesamt ein Anteil von rund 9 % des derzeitigen Primärenergieverbrauchs durch Biomasse gedeckt werden (siehe Grafik “Potenzial biogener Brenn-/Kraftstoffe”). Bei einem Anbau auf 4 Mio. ha steigt dieser Anteil auf 11%.

Heutige Nutzung

Ob 9 % oder 11 % – von solchen Zielen sind wir derzeit noch entfernt. Nur beim Deponie- und Klärgas sowie in naher Zukunft auch beim Altholz wird mehr als die Hälfte des Potenzials schon genutzt. Während die Nutzung von Biomasse in Ländern wie Österreich und Finnland schon lange weit verbreitet ist, setzt sie sich hierzulande erst allmählich durch. Immerhin 4,4 % des Stromverbrauchs werden in Deutschland aus Biomasse, Klär- und Deponiegas gedeckt (Stand Ende 2008). Rund 9 Millionen kleine Biomasse-Heizungen und andere Anlagen decken 6,9 Prozent der Wärmeversorgung.

2 Millionen Hektar – das sind 17 Prozent der deutschen Ackerflächen – werden für den Anbau von Energie- und Industriepflanzen verwendet. Bei der Herstellung von

→ **Biogasanlagen in Deutschland**



Quelle: IE Leipzig 2008

Kleine landwirtschaftliche Biogasanlagen gibt es im Süden, die meisten größeren Anlagen im Norden Deutschlands.

Biodiesel aus Raps ist Deutschland sogar Weltmeister (siehe Kapitel “Biokraftstoffe”).

Insgesamt trägt Biomasse 6,6 % zum deutschen Endenergiebedarf bei. Dieser Anteil ist deutlichen Schwankungen unterworfen, da etwa jede fünfte Wohnung in Deutschland neben der Zentralheizung auch über einen Kaminofen oder eine vergleichbare Holzfeuerung verfügt. Wie intensiv diese Feuerungen genutzt werden, hängt unter anderem von den Preissprüngen auf dem Heizölmarkt ab. Der jüngste Preisschub auf dem Ölmarkt und die Debatte um die Gasversorgung haben zu einem spürbaren Marktwachstum geführt. Innerhalb weniger Jahre wurden in Deutschland 105.000 Holzpelletheizungen (Stand Ende 2008) installiert.

Umweltnutzen biogener Brennstoffe

Allen Nutzungsformen biogener Brennstoffe gemeinsam ist der erhebliche Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz. Zur Bereitstellung von Biomasse müssen nur Bruchteile des Energiegehaltes in Form von fossiler Energie aufgewendet werden (siehe auch S. 22). Das gilt für Rest- und Abfallstoffe, die gesammelt, transportiert und aufbereitet werden müssen, aber auch für Energiepflanzen, bei denen zusätzlich der Anbau und die

→ Ökobilanz Biomasse

Quelle: Kaltschmitt/Reinhardt 1997

Biobrennstoffe bei Substitution von Kohle	Ressourcen-verbrauch	Treibhauseffekt	Stratosphärischer Ozonabbau	Versauerung	Toxizität (Beispiel NO_x)
Winterweizen	+	+	–	+ / –	–
Chinaschilf	+	+	–	+	+
Pappel (nachwachsend)	+	+	–	+	+
Weizenstroh	+	+	+ / –	+	+
Fichten-Waldrestholz	+	+	+ / –	+	+
Biobrennstoffe bei Substitution von Erdgas					
Winterweizen	+	+	–	–	–
Chinaschilf	+	+	–	–	–
Pappel (nachwachsend)	+	+	–	–	–
Weizenstroh	+	+	–	–	–
Fichten-Waldrestholz	+	+	–	–	–

Umwelteinwirkungen der Biomasse-Nutzung im Vergleich zu fossilen Brennstoffen: + Vorteile des Bioenergieträgers; + / – ausgeglichen bzw. abhängig von der Bewertungsmethode; – Nachteile des Bioenergieträgers

Herstellung von Betriebsstoffen (je nach Anbauform Düngemittel, Pestizide etc.) bilanziert werden müssen. Diese positive Energiebilanz schont nicht nur die Reserven der endlichen Energieträger, sondern verringert auch die klimawirksamen CO_2-Emissionen erheblich. Denn durch die Biomasse werden fossile Energieträger ersetzt und durch den geschlossenen CO_2-Kreislauf keine treibhauswirksamen CO_2-Emissionen ausgestoßen. Auch unter Berücksichtigung der Treibhausgase Methan und Lachgas – letzteres wird bei angebauter Biomasse durch die Herstellung von Düngemitteln und durch stoffliche Vorgänge im Boden freigesetzt – bleibt die Bilanz deutlich positiv.

Bei der energetischen Nutzung von Biogas kommt ein weiterer Klimavorteil hinzu. Bei schlecht durchlüfteter Kompostierung von Bioabfällen, in Mülldeponien oder Faulbehältern entsteht bei Vergärungsprozessen Methan, das vielfach unkontrolliert freigesetzt wird. Methan ist aber 25-mal so klimawirksam wie CO_2. Die Verbrennung dieses Methans zu CO_2 in den Biogasanlagen "entschärft" also das Treibhausgas.

Doch nicht für alle Umweltprobleme ist die Umweltbilanz eindeutig positiv (Tabelle "Ökobilanz Biomasse"). Bei nachwachsenden Rohstoffen haben beispielsweise die Anbauweise, der Standort und die Düngung einen großen Einfluss auf die Schadstoffemissionen. Aspekte der umwelt- und naturverträglichen Flächen- und Rohstoffnutzung müssen darum genauso beachtet werden wie bei den Biokraftstoffen (siehe S. 113).

Der Zielkonflikt zwischen der Schonung der Rohstoffvorräte und des Klimas einerseits und anderen ökologischen Problembereichen andererseits kann nicht allein wissenschaftlich gelöst werden. Hier müssen die Entscheidungsträger eine Gewichtung vornehmen. In der Politik wird dem Klimaschutz derzeit eine besonders große Bedeutung zugemessen. Hinzu kommt, dass durch einen ökologisch optimierten, extensivierten Anbau von Bioenergieträgern mit niedrigem Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, durch eine weitgehende Nutzung von Reststoffen und durch weiter verbesserte Nutzungstechnologien dieser Zielkonflikt entschärft werden kann.

Infos zur Biomasse

→ Aktuelle Informationen und Tests von Biomasse-Heizungen für Privathaushalte bieten die Verbraucherzeitschriften (Stiftung Warentest, Öko-Test). Viele Unternehmen der Heizungsbranche installieren mittlerweile Biomasse-Heizungen.

→ Verband der Biogas-Industrie: www.fachverband-biogas.de

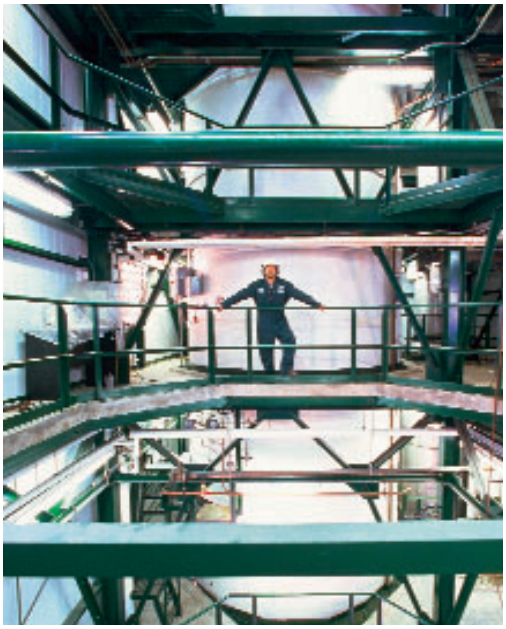
→ Informationsdienst zu Biomasse und Nachwachsende Rohstoffe: www.carmen-ev.de

→ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: www.fnr.de

BIOKRAFTSTOFFE – MOBILITÄT AUS PFLANZEN UND ABFÄLLEN

Die Fakten:

- **Im Jahr 2008 deckten Biokraftstoffe 5,9 % des deutschen Kraftstoffbedarfs; den größten Anteil hat dabei der Biodiesel. Der Absatz an Pflanzenöl und Biodiesel ist gegenüber 2007 gefallen, die Bioethanolproduktion gestiegen.**
- **Eine Beimischungspflicht verlangt von Mineralölkonzernen gewisse Anteile an Biokraftstoffen im Benzin und Diesel. Außerdem sind reine Biokraftstoffe ganz oder teilweise steuerbefreit.**
- **Zunehmend werden auch Biokraftstoffe und -rohstoffe, vor allem Palm- und Sojaöl, aus dem Ausland importiert. Strenge Kriterien an die Nachhaltigkeit müssen künftig ökologische Fehlentwicklungen vermeiden.**
- **Neue Kraftstoffe, wie BtL (Biomass-to-Liquid), Holz- oder Biogas, werden zukünftig die Energiebilanz und -ausbeute steigern.**



Zuckerrübenverarbeitung, Fermenter und Biodiesel an der Zapfsäule

Der Verkehr braucht sehr viel Energie. Mehr als 51 Mio. t Kraftstoffe auf Erdölbasis wurden im Jahr 2007 in Deutschland getankt, verbrannt und letzten Endes als Kohlendioxid in die Atmosphäre geblasen. Insgesamt ist der Verkehr nach den Haushalten der zweitgrößte Energieverbraucher, dicht gefolgt von der Industrie.

Drei Probleme machen Veränderungen dringend notwendig: Die **Importabhängigkeit** von Erdölprodukten, die **Endlichkeit fossiler Ressourcen** und der **Klimawandel**. Zwar sind die klimaschädlichen CO_2-Emissionen aus dem Straßenverkehr seit 1999 leicht rückläufig, aber das wachsende Verkehrsaufkommen und eine Zunahme der Emissionen aus dem Luftverkehr mindern die Reduktionserfolge. Auch der Anteil der umweltfreundlicheren Verkehrsmittel Bahn, Bus und Binnenschiff sinkt. Problematisch ist auch der Güterverkehr. Die erwünschte Entkopplung von Transportleistung und Wirtschaftswachstum hat noch nicht stattgefunden. Biokraftstoffe sind eine Möglichkeit, Mineralöl als Energieträger im Verkehr teilweise zu ersetzen, denn damit werden die drei oben genannten Probleme gemeinsam angegangen. Die Ausgangsstoffe können im Land produziert werden: damit sinkt die Importabhängigkeit. Die Rohstoffe für Bioenergieträger wachsen wieder nach – sie sind also erneuerbar. Und schließlich ist ein enormer Vorteil der Biokraftstoffe ihre prinzipielle CO_2-Neutralität. Denn das CO_2, das bei ihrer Verbrennung entsteht, haben sie beim Anbau auf dem Feld der Atmosphäre entnommen (siehe Kapitel “Biomasse als Brennstoff”).

Kraftstoff vom Acker – Raps als Rohstoff ...

... und in der Verarbeitung zu Biodiesel (Rapsölmethylester)

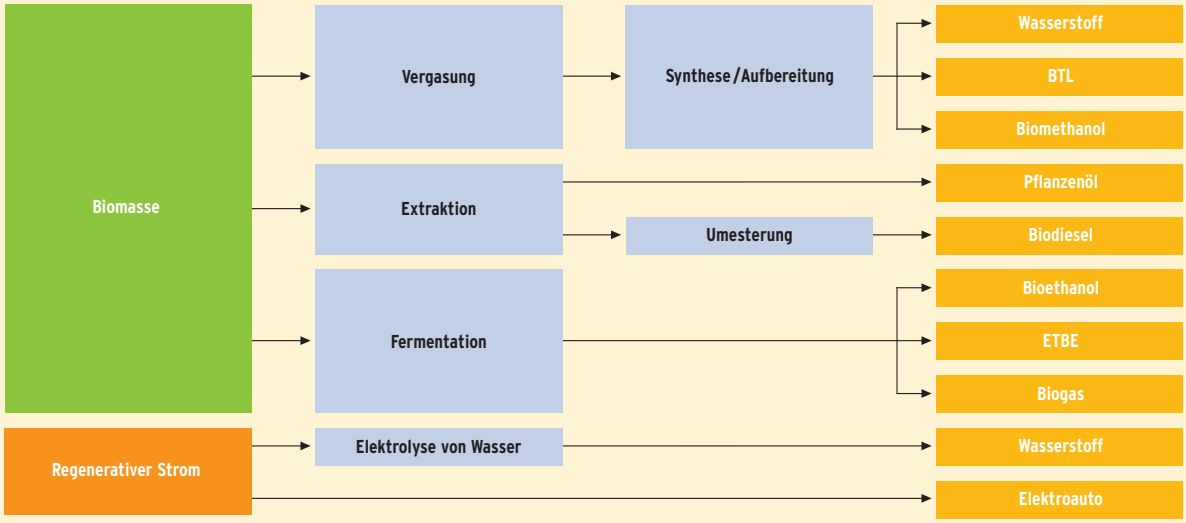
Eine Fülle an Möglichkeiten

Es gibt nicht den einen Biokraftstoff im Verkehr, sondern eine ganze Reihe flüssiger und gasförmiger Bioenergieträger, die zum Einsatz kommen können (siehe Grafik "Kraftstoffpfade"). Bei den flüssigen Biokraftstoffen sind hierzulande die Pflanzenöle aus Raps und Sonnenblumen und die verarbeitete Form des Rapses als Biodiesel (Rapsölmethylester) am bekanntesten. Aber auch der so genannte Bioalkohol (Ethanol) aus Zuckerrüben, Getreide oder Kartoffeln und Kraftstoffe aus holzartiger Biomasse, wie der sogenannte BTL-Kraftstoff (Biomass-to-Liquid), sind wichtige Vertreter der flüssigen Biokraftstoffe.

Daneben werden auch gasförmige Kraftstoffe diskutiert, wie etwa Bio-, Klär-, und Deponiegas sowie Biowasserstoff und Holzgas, die mehr oder weniger für den Einsatz im Verkehr geeignet sind. Die Ausgangsstoffe sind ebenso vielfältig, denn sie stammen aus der Land-, Forst- und Fischwirtschaft, aus Rest- und Abfallstoffen oder aus thermochemischen Prozessen.

Derzeit hat die Biomasse als einziger erneuerbarer Energieträger im Verkehr größere Bedeutung. Der Sektor der biogenen Kraftstoffe verzeichnete seit 1990 ein beachtliches Wachstum. Im Jahr 2007 deckten Biokraftstoffe 6,1 % des Gesamtverbrauchs an Kraftstoffen in Deutschland ab, ein Großteil davon durch Biodiesel (4,6 %), außerdem spielen Pflanzenöle (0,7 %) und Bioethanol (0,7 %) eine Rolle. In der Produktion von Biodiesel ist Deutschland Weltmeister. Andere erneuerbare Energien kommen höchstens in Nischenanwendungen und im leitungsgebundenen (Bahn-)Verkehr zum Einsatz.

→ Kraftstoffpfade aus erneuerbaren Energien



Einige der möglichen Pfade, um Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien zu produzieren.

Biodiesel als Endprodukt an der Tankstelle

Rohstoff Raps

Der Erfinder des Dieselmotors setzte von Anfang an auf Biokraftstoffe für seinen Motor. “Der Gebrauch von Pflanzenöl als Kraftstoff mag heute unbedeutend sein. Aber derartige Produkte können im Laufe der Zeit ebenso wichtig werden wie Petroleum und diese Kohle-Teer-Produkte von heute”, schrieb Rudolf Diesel 1912 in seiner Patentschrift. Raps-Biodiesel, RME oder auch Rapsölfettsäuremethylester genannt, ist der in Deutschland am weitesten verbreitete Biokraftstoff – mit jetzt allerdings stagnierender bis rückläufiger Tendenz. Der Biodieselabsatz stieg von rund 1,3 TWh im Jahr 1999 auf knapp 28 TWh im Jahr 2008.

Auf Grund der gesetzlichen Rahmenbedingungen wird der größte Teil des Biodiesels derzeit dem konventionellem Diesel beigemischt. Nur ein kleiner Teil wird als Reinkraftstoff getankt, beispielsweise in LKW von Fuhrunternehmen. Aber nicht alle Biodieselfahrzeuge sind geeignet für eine solche Betankung mit reinem Biodiesel. Man sollte sich daher beim Hersteller erkundigen, ob das eigene Modell für den Biodieselbetrieb freigegeben ist, oder einen Blick in die Betriebsanleitung werfen. Ansonsten drohen Schäden unter anderem im Einspritzsystem, denn Biodiesel greift bestimmte Kunststoffe an. Bei Fahrzeugen, die von ihren Herstellern für Biodiesel freigegeben wurden, sind die kritischen Materialien durch biodieselresistente Kunststoffe ersetzt worden. Die Einführung des Partikelfilters bei Dieselfahrzeugen führt zudem dazu, dass reiner Biodiesel in PKW-Neufahrzeugen nicht mehr freigegeben wird. Denn das Abbrennen des Partikelfilters zur Reinigung ist nicht mehr rückstandsfrei möglich.

Reines Rapsöl kann in konventionellen Dieselfahrzeugen nicht ohne weiteres eingesetzt werden. Spezielle Motoren sind technisch möglich, etwa die sogenannten Elsbett-Motoren. Aber im normalen Pkw aus der Großserie wird sich der Einsatz von Rapsöl kaum durchsetzen. Ungelöste Probleme sind die Kaltstarteigenschaften des kälteempfindlichen Öls und die Einhaltung strengerer Abgasvorschriften. Der Einsatz wird darum auf Nischenanwendungen beschränkt bleiben.

Ölpalmen, Soja und Jatropha

Biodiesel kann neben Rapsöl, dem in Deutschland lange dominierenden Rohstoff, auch aus anderen pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten hergestellt werden. Der allgemeine Preisanstieg bei Agrargütern sowie die zeitgleiche Einführung einer schrittweisen Besteuerung von Biodiesel (Energiesteuergesetz) und einer – in Anbetracht der vorhandenen Produktionskapazität – relativ niedrigen Biodiesel-Quote (Biokraftstoffquotengesetz) führten seit dem Jahr 2006 zu einem verstärkten Einsatz preisgünstigerer Rohstoffe wie Palm- oder Sojaöl. Dies betrifft insbesondere den reinen Biodiesel (B100), der im Sommer 2008 bereits überwiegend aus importierten Pflanzenölen produziert wurde.

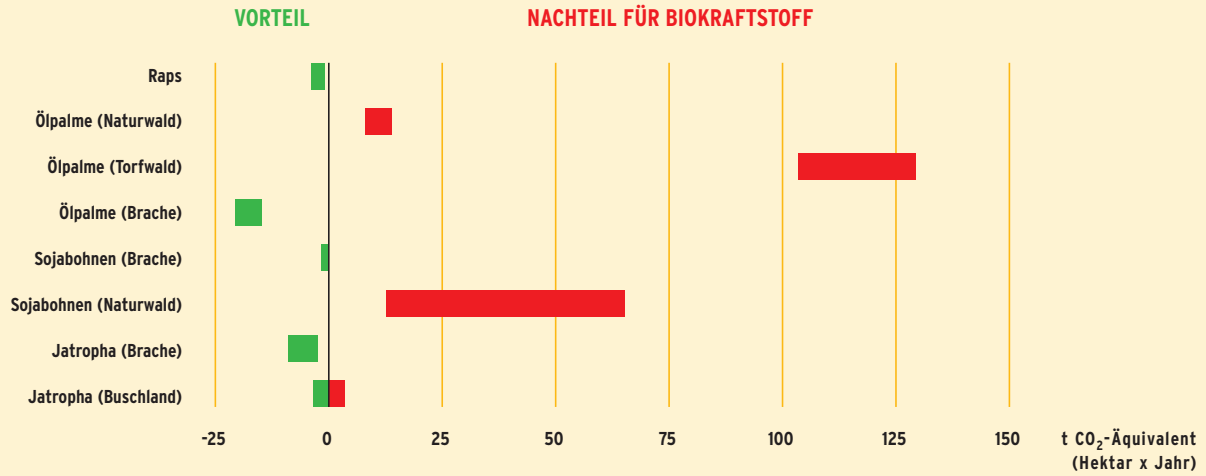
Neben Raps gibt es andere Ölsaaten wie Jatropha-, Soja oder Palmöl. Da die heimische Produktion von Rapsbiodiesel nicht ausreicht, um die zur Erfüllung der Biodieselquote erforderlichen Mengen bereitzustellen, werden Biokraftstoffe importiert. Soja- und Palmölbiodiesel machen hier den größten Anteil aus. Biokraftstoffe aus tropischen Regionen können oft kostengünstiger als in Europa produziert werden und weisen aufgrund der klimatischen Bedingungen eine hohe Flächenproduktivität auf.

Die Einfuhr von Biomasse ist in zweierlei Hinsicht kritisch zu sehen: Zum einen wird die Importabhängigkeit nicht gesenkt, wie es bei heimischen Rohstoffen der Fall wäre, zum anderen können mit dem Biomasseanbau in subtropischen und tropischen Gebieten erhebliche negative Auswirkungen auf Umwelt und Natur verbunden sein. Eine Ausweitung der bestehenden Palmöl- oder Sojaproduktion für den Biokraftstoffmarkt führt in der Regel zu Landnutzungsänderungen, beispielsweise wenn tropischer Regenwald für neue Plantagen gerodet wird. Solche direkten Landnutzungsänderungen können sowohl die irreversible Vernichtung der biologischen Vielfalt als auch Mehremissionen an Treibhausgasen zur Folge haben, letzteres vor allem dann, wenn der Kohlenstoffgehalt der Flächen stark reduziert wird. Dies würde sämtliche Klimaschutzbemühungen konterkarieren (siehe unten). Dies ist selbst dann der Fall, wenn keine direkte Regenwaldrodung, jedoch die verdrängte Nutzung dann indirekt zur Entwaldung führt.

Ölpalmen wachsen in allen tropischen Regionen rund um den Äquator. Über 85 % des weltweit vorhandenen Palmöls werden derzeit von Malaysia und Indonesien produziert. Zunehmend legen aber auch Farmer in Brasilien und Kolumbien Palmölplantagen an. Ein großer Vorteil von Palmöl ist seine hohe Flächenproduktivität. Dadurch trägt Palmöl in effizienter Weise zu Ressour-

→ Erdöl oder Pflanzen?

Quelle: IFEU 2008



Durch die Produktion von Biodiesel aus Raps, Ölpalme, Soja und Jatropha eingesparte (oder zusätzlich emittierte) Treibhausgase pro Jahr und Hektar an verschiedenen Standorten.

censchonung und Klimaschutz bei – wenn es nachhaltig produziert wird. Um genau diesen Nachhaltigkeitsaspekt drehen sich, ähnlich wie bei Soja, die derzeitigen Diskussionen um Zertifizierungskriterien. Denn da Ölpalmen nur in Äquatornähe gedeihen, können Ausweitungen der Produktion nur dort stattfinden. Dadurch entsteht zwangsläufig eine Flächenkonkurrenz zu tropischen Regenwaldgebieten. Palmöl wird ähnlich wie Rapsöl in Raffinerien zu Palmöl-Biodiesel verarbeitet.

Sojaöl wird vor allem in den USA, Brasilien, Argentinien und China produziert. Es fällt überwiegend als Nebenprodukt in der Futtermittelherstellung an: Aus Sojabohnen wird das eiweißhaltige Sojaextraktionsschrot gewonnen und gleichzeitig das Öl mit abgepresst. Zur reinen Ölgewinnung wäre Soja nicht das Produkt erster Wahl, da der Flächenertrag im Vergleich zu anderen Ölsaaten niedrig ist. Da aber große Landflächen zur Futtermittelgewinnung mit Soja bepflanzt werden, fällt auch eine große Menge an Sojaöl an, das nach der Umesterung als Biodiesel eingesetzt wird.

Der hohe Flächenbedarf für Soja führt teilweise zur Vernichtung von Savannengebieten wie beispielsweise der Cerrado-Region in Brasilien, die eine große Artenvielfalt aufweist. Bei den sogenannten “indirekten Landnutzungsänderungen” führt der zunehmende Soja-Anbau auch zu einer Verdrängung von Zuckerrohr in Regenwaldgebiete, die dann für den Zuckerrohranbau gerodet werden.

Jatrophaöl wird in Europa bislang kaum eingesetzt, da der kommerzielle Anbau der Pflanze noch zu neu ist. Dennoch wurde Jatropha in den letzten Jahren als eine Art Wunderpflanze gepriesen, da die Pflanze auch auf nährstoffarmen und wüstenähnlichen Böden gedeiht und man sich von ihrem Anbau Erosionsschutz und eine Verbesserung des Bodens verspricht. Aus den Nüssen dieses Strauches kann Öl gewonnen werden, die Früchte selber sind giftig. Daher ist bei Jatropha auch keine direkte Konkurrenz zwischen Biotreibstoffen und Nahrungsmitteln gegeben.

Jatropha kann in subtropischen und tropischen Regionen kultiviert werden. Hauptanbaugebiet sind derzeit Indien, China und Indonesien, aber auch in Afrika und Amerika sind neue Plantagen geplant. Jatropha-Biodiesel kann fossilen Diesel ersetzen und damit zur Treibhausgasminderung beitragen. Allerdings sind auch bei dieser Pflanze bestimmte Bedingungen zu beachten: Der Anbau von Jatropha sollte ausschließlich auf Böden erfolgen, auf denen nicht auch Nahrungsmittel oder ertragreichere Energiepflanzen angebaut werden könnten. Meist sind das Regionen, in denen die wirtschaftlichen Möglichkeiten der lokalen Bevölkerung aufgrund der ungünstigen klimatischen Bedingungen eingeschränkt sind. Daher kann der Gewinn und Verkauf von Jatrophaöl den Menschen vor Ort eine Existenzgrundlage schaffen. Sobald aber gute Böden für den Jatrophaanbau genutzt werden, sind die besonderen Vorteile von Jatropha dahin. Einige Firmen kaufen derzeit erhebliche Landflächen in Indien und Afrika auf, um in großem Maßstab Jatropha anzubauen. Da die Jatrophapflanze auf gutem Boden und mit Bewässerung höhere Erträge bringt als auf nährstoffarmen Böden, wird Jatropha zunehmend auf Böden angebaut, die auch Nahrungsmittel produzieren könnten.

Aus Tansania beispielsweise häufen sich Meldungen, dass große fruchtbare Flächen anstatt mit Reis mit Jatropha bepflanzt werden. Jatropha hat also durchaus Potenzial, es hängt aber von den Randbedingungen ab, ob das Potenzial ökologisch günstig genutzt wird oder ob Fehlentwicklungen auftreten.

Umweltfreundlich am Steuer – mit Bioalkohol im Tank

Die Alkohole Ethanol und Methanol eignen sich sehr gut als Kraftstoffe im Verkehr, da mit ihnen schon seit langem Erfahrungen gesammelt wurden. Schon Nikolaus August Otto, nach dem der Ottomotor benannt ist, verwendete für seine Entwicklungen Ethanol als Kraftstoff. Und auch Henry Ford hatte sein berühmtes T-Modell für diesen Kraftstoff entworfen.

Reines Ethanol erfordert allerdings besondere Motoren, wie sie schon in den 1980er Jahren in Brasilien verbreitet waren oder die in so genannten “Flexible Fuel Vehicles” eingebaut sind. Es geht jedoch auch einfacher: Als Zumischung zu Ottokraftstoff ist Bioethanol bereits heute im Markt. Dabei kann reines Bioethanol verwendet werden, oder nach einer weiteren chemischen Umwandlung sein Ester ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether). Dieses kann zusätzlich den gesundheitlich umstrittenen Oktanzahlverbesserer MTBE (Methyl-Tertiär-Butyl-Ether) ersetzen und so zu einer Minderung der Luftschadstoffemissionen beitragen.

Die USA sind heute mit rund 18 Mrd. Liter (2006) der weltweit größte Hersteller von Bioethanol , dicht gefolgt von Brasilien. In den USA wird das Bioethanol überwiegend dem Benzin beigemischt, während in Brasilien Flex-Fuel-Fahrzeuge verbreitet sind, die man mit reinem Bioethanol oder beliebigen Gemischen aus Ethanol und Benzin betanken kann. In Deutschland wurden im Jahr 2007 insgesamt 460.000 Tonnen Bioethanol abgesetzt.

Biokraftstoffe der zweiten Generation

Neben Biodiesel und Bioethanol werden heute die so genannten “Biokraftstoffe der zweiten Generation” entwickelt. Ziel ist es, die Bandbreite möglicher Einsatzstoffe zu erweitern, effiziente Verfahren zu entwickeln und die Produktionskosten zu senken.

Einige der Verfahren beruhen auf der Vergasung von Biomasse. Werden Holz, Stroh oder andere Biomassen nach der Vergasung in einem so genannten Fischer-Tropsch-Verfahren in Flüssigkraftstoff umgewandelt, lässt sich die Energie der ganzen Pflanze nutzen – anders als bei der Produktion von Biodiesel aus Raps, bei der nur die Samen zu Treibstoff werden. BTL heißt der Kraftstoff in Fachkreisen, “Biomass-to-Liquid” oder “Flüssiger Treibstoff aus Biomasse”.

Diese maßgeschneiderten Kraftstoffe haben hervorragende Verbrennungseigenschaften. Darum wartet insbesondere die Automobilindustrie auf eine Produktion in Industriemaßstäben. Leider sind die verschiedenen Herstellungsverfahren noch nicht vollständig technisch ausgereift. Derzeit laufen zu allen Verfahren verschiedene Forschungs- und Pilotvorhaben und man muss abwarten, ob und welche Verfahren sich als praxistauglich erweisen.

Diese Anlage vergast Biomasse und produziert daraus einen synthetischen Biokraftstoff.

Die unter Hitze und Luftabschluss vergaste Biomasse muss nicht zwangsläufig in einen Flüssigkraftstoff verwandelt werden. Man kann dieses Erdgas-ähnliche Gas auch aufbereiten und in das Erdgas-Netz einspeisen. Außerdem lässt sich der Wasserstoff aus diesem Gas abtrennen und als Kraftstoff für Brennstoffzellen-Autos oder spezielle Wasserstoff-Verbrennungsmotoren nutzen.

Wasserstoff kann nicht nur aus Biomasse, sondern auch durch die elektrolytische Zerlegung von Wasser produziert werden (siehe S. 62). Dazu ist Strom aus erneuerbaren Energiequellen erforderlich. Dies wird wegen der erforderlichen hohen Investitionen in Anlagentechnik und Infrastruktur aber erst langfristig angedacht.

Biogas, das nicht aus der Vergasung von Biomasse entsteht, sondern durch die bakterielle Vergärung von Gülle oder Mais (siehe Kapitel “Biomasse als Brennstoff”), kann wie Erdgas oder Biomethan in Fahrzeugen eingesetzt werden. Dazu muss es allerdings so aufbereitet werden, dass es Erdgasqualität besitzt (siehe Kapitel “Biobrennstoffe”).

Auch die Produktionsverfahren für Bioethanol werden verfeinert. Unter anderen ist ein Verfahren in der Entwicklung, das auch die Nutzung von Zellulose aus Holz und Stroh zur Kraftstoffherstellung erlaubt. Dazu werden Enzyme eingesetzt, die die Zellulosemoleküle aufbrechen. Anschließend kann die behandelte Zellulose dann vergärt werden. Dieses Verfahren ist derzeit großtechnisch noch nicht verfügbar. Zu welchen Kosten und mit welcher Umweltbilanz die Treibstoffproduktion erfolgen kann, wird erst in einigen Jahren abzuschätzen sein.

Laborkontrolle von Biodiesel

Ökobilanz von Biokraftstoffen

Umwelt- und Ressourcenschonung sind wesentliche Bestandteile einer nachhaltigen Entwicklung. Daher muss auch jeder neue Kraftstoff sich die Frage gefallen lassen, ob sein Einsatz ökologisch überhaupt sinnvoll ist. Die Ökobilanz ist eine Methode, um mögliche Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes zu erfassen. Möglichst alle wichtigen Prozesse, die mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung in Verbindung stehen, müssen dabei betrachtet werden. Erstellt man Ökobilanzen der Biokraftstoffe, so sind Anbau und Aufbereitung, Verteilung und Nutzung, sowie möglicherweise entstehende Abgase bei der Verbrennung wichtige Aspekte.

An erster Stelle der Energiepflanzen-Nutzung steht ihr Anbau. Auf einem Hektar Acker können pro Jahr beispielsweise zwischen 3 bis 4 Tonnen Rapssaat geerntet werden, woraus sich etwa 1.300 bis 1.700 Liter Biodiesel gewinnen lassen. Die Fläche eines Fußballfeldes reicht also aus, um Kraftstoff für die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Pkws bereitzustellen. Die Rapssaat wird gepresst, raffiniert – unerwünschte Nebenprodukte werden entfernt – und bei Biodiesel auch noch chemisch verändert. Bei der Umesterung zu Biodiesel wird das große Rapsölmolekül durch Zugabe von Methanol in jeweils drei Bruchstücke zerlegt. Dadurch entstehen nicht nur dem Dieselkraftstoff ähnliche Moleküle, sondern gleichzeitig auch der Chemierohstoff Glyzerin.

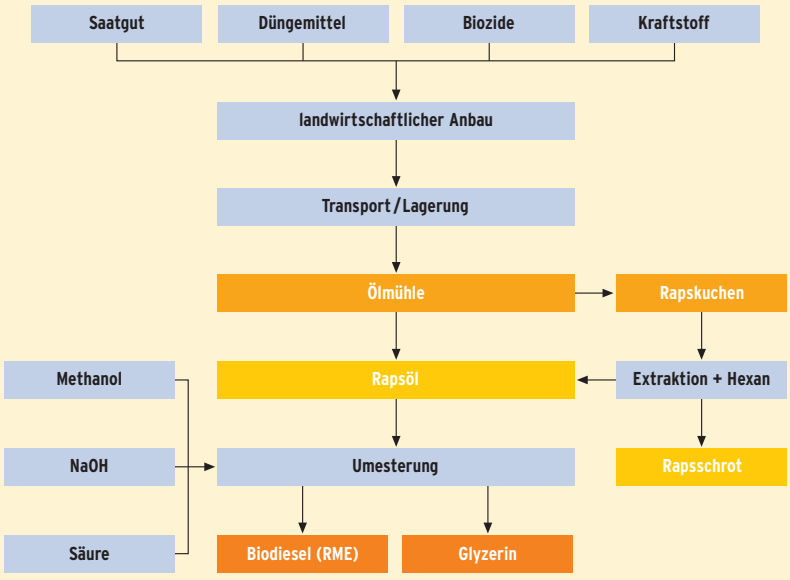
Ethanol wird in Deutschland bevorzugt aus Zuckerrüben, Weizen oder Roggen gewonnen, wobei die Zuckerrübe den höchsten Ertrag liefert. Die Zuckerrüben werden zerkleinert und aus den Wurzelkörpern wird eine Zuckerlösung extrahiert. Bei stärkehaltigen Pflanzen muss die Stärke aus den Pflanzen gelöst und verzuckert werden. Die gewonnene zuckerhaltige Lösung wird dann mit Hefen vergoren. Schließlich wird der energiehaltige Alkohol abgetrennt.

Im Jahr 2007 wurden in Deutschland im Schnitt 62 t Rüben pro Hektar geerntet, woraus etwa 6.600 Liter Bioethanol gewonnen werden können. Betrachtet man den Energieinhalt des geernteten Ethanols, so ist der Ertrag fast doppelt so hoch wie bei RME.

Für den Prozess der Kraftstoffherstellung werden jedoch selber Energie und Einsatzstoffe benötigt – und hier kommt die Ökobilanz zum Zug. Ein großer Teil des Ener-

→ Herstellungsprozess von Biodiesel

Quelle: IFEU



Vom Feld zur Tankstelle: Herstellung von Biodiesel

Wartungsarbeiten an einer Anlage zur Herstellung von synthetischem Biokraftstoff der zweiten Generation. Beim Herstellungsverfahren wird durch das Vergasen einer Biomasse aus Holzhackschnitzeln unter Hochdruck Biodiesel gewonnen.

giebedarfs beim Energiepflanzenanbau entfällt auf die Düngemittelproduktion. Auch bei der Feldarbeit mit den Landmaschinen wird Energie verbraucht. Bei der Produktion von Biodiesel hat die Umesterung vor allem durch den hohen Methanolbedarf den größten Anteil am Energiebedarf. Dennoch: Insgesamt fällt die Energie- und Klimabilanz des Biodiesels deutlich positiv aus (Grafik "Klimabilanz Bioenergieträger"). Das Ergebnis hängt allerdings davon ab, wie die Nebenprodukte, vor allem Rapsschrot und das wertvolle Glyzerin, genutzt werden. Rapsschrot kann anstatt Soja als Futtermittel verwendet werden. Glyzerin wird vor allem als Rohstoff in der Chemie eingesetzt, etwa zur Produktion von Kosmetik-Artikeln. Wird das heute fossil hergestellte Glyzerin durch das nachwachsende ersetzt, so ergibt sich eine CO_2-Gutschrift für den Biodiesel, die den Mehraufwand der Umesterung aufwiegt. Da Glyzerin bei der Rapsöl-Herstellung nicht anfällt, ist der Biodiesel gegenüber dem Rapsöl im Vorteil. Auch für Bioethanol aus Zuckerrüben, Weizen und Roggen ist die errechnete Energiebilanz gut.

Während alle Bioenergieträger deutlich zur Schonung fossiler Ressourcen und zur Minderung von Treibhausgasen beitragen, gibt es durchaus auch ökologische Nachteile von Biokraftstoffen (Tabelle "Ökobilanz Bioenergieträger"). So führt der Einsatz von Biokraftstoffen zu einer höheren Versauerung der Böden und Gewässer und zu höheren Emissionen von stickstoffhaltigen Substanzen. Wie bei der Nutzung von Biomasse als Brennstoff (Kapitel "Biomasse als Brennstoff") muss hier durch die Entscheidungsträger eine Abwägung bezüglich der ökologischen Bedeutung der einzelnen Vor- und Nachteile vorgenommen werden, wobei der Klimaschutz derzeit auf der umweltpolitischen Rangliste ganz oben steht.

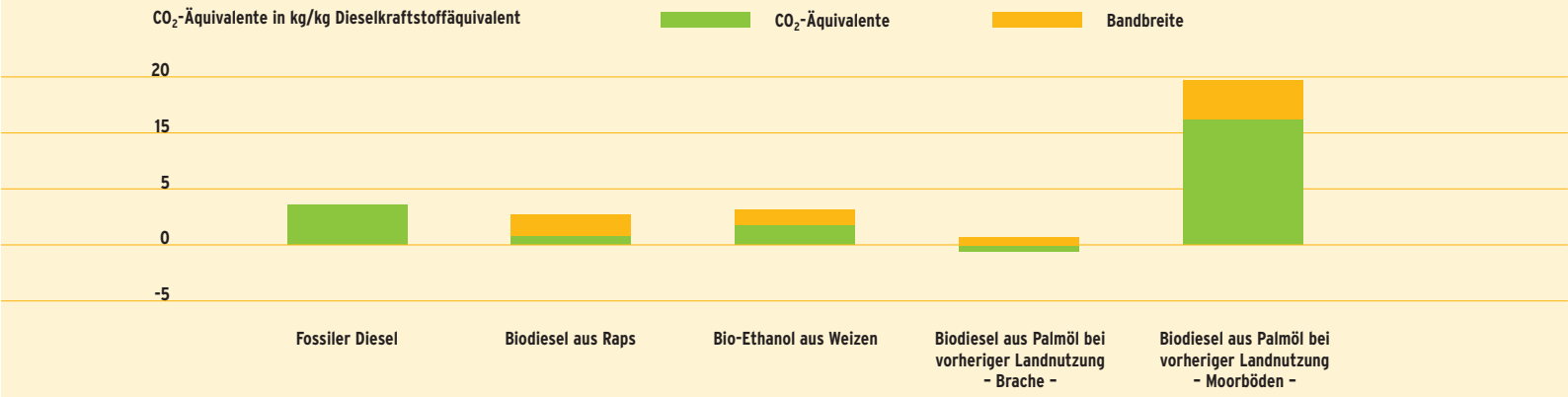
Biokraftstoffe – nachhaltig genutzt

Besonders bei den importierten Biokraftstoffen und deren Rohstoffen ist eine intensive Debatte über die Nachhaltigkeit dieser Nutzung entbrannt. Wird für den Ölpalmenanbau tropischer **Regenwald** gerodet, werden dadurch so viele Treibhausgase freigesetzt, dass dieser Palmölbiodiesel insgesamt zu mehr Treibhausgasen führt als der Einsatz von fossilem Diesel (siehe Grafik "Klimabilanz"). Ein richtiger "Klimakiller" ist Palmölbiodiesel, der von ehemaligen Torfwaldgebieten stammt, denn in den Torfböden ist viel CO_2 gespeichert, das durch die Entwässerung und landwirtschaftliche Nutzung freigesetzt wird. Palmenplantagen auf solchen Böden führen daher zu einem Vielfachen der Treibhausgasemissionen fossiler Kraftstoffe und verschärfen so den Klimawandel.

Werden dagegen Brachflächen für einen Ölpalmenanbau nutzbar gemacht, so führt das zu hohen Energie- und Treibhausgas-Einsparungen. Es gibt in Südostasien viele solcher ungenutzten Flächen. Ihre Rekultivierung bedarf allerdings hoher Anfangsinvestitionen und es muss auch noch untersucht werden, ob diese Flächen sich tatsächlich für Energiepflanzen eignen. Es zeigt sich insgesamt: Palmölbiodiesel kann ökologisch nur bewertet werden, wenn man die Bedingungen kennt, unter denen er produziert wurde. Darum ist es notwendig,

→ Klimagasemissionen bei der Herstellung von Biokraftstoffen

Quelle: IFEU 2007



Klimabilanz ausgewählter Biokraftstoffe. Ob und um wie viel ein Biotreibstoff besser ist als fossiler Diesel, hängt stark davon ab, wie er angebaut wird und wie die Flächen vorher genutzt wurden.

Kriterien für einen nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen aufzustellen. Ohne sie läuft man Gefahr, das Gegenteil des angestrebten Klimaschutzzieles zu erreichen. Dabei müssen sich die Kriterien auf den Anbau der Nutzpflanzen beziehen, ohne deren spätere Verwendung zu beachten. Denn auch Palm- oder Sojaöl, das im Nahrungsmittel- oder Konsumbereich eingesetzt wird, sollte nachhaltig angebaut werden, sonst verlagern sich die negativen Effekte lediglich von der Biotreibstoffproduktion in den Nahrungsmittelsektor. Und der überwiegt immer noch: Denn bisher werden nur etwa 5 % des Palmöls energetisch genutzt, drei Viertel gehen in den Ernährungssektor.

Werden strenge Nachhaltigkeitskriterien erfüllt, dann können Biokraftstoffe nicht nur das Klima entlasten, sondern sind auch eine Einkommenschance für den ländlichen Raum – gerade in Entwicklungsländern. Die Nachhaltigkeitszertifizierung von Biokraftstoffen wurde in Deutschland 2006 im Rahmen des Biokraftstoffquotengesetzes (BioKraftQuG) verabschiedet. Im Verlauf jenes Jahres hatte sich die Diskussion über die Nachhaltigkeit von Biokraftstoffen auf internationale Organisationen ausgedehnt und wird seither mit großer öffentlicher Anteilnahme geführt. Auf der globalen Ebene stellt die Global Bioenergy Partnership (GBEP) das maßgebliche Forum dar, um im internationalen Kontext eine Verständigung über Klimabilanzmethodik und Nachhaltigkeitskriterien zu erzielen. Deutschland bringt sich in diesen Prozess intensiv ein.

Quelle: IFEU

→ Ökobilanz Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen

Vergleichsparameter	Vorteile für Bioenergieträger	Nachteile für Bioenergieträger
Ressourcenverbrauch	• Einsparung fossiler Energien	• Verbrauch mineralischer Ressourcen
Treibhauseffekt	• geringere Emission von Treibhausgasen	
Stratosphärischer Ozonabbau		• höhere Lachgas-Emissionen
Versauerung		• stärkere Versauerung
Photosmog		• höheres Ozonbildungspotenzial
Eutrophierung		• höhere NO_x- und NH_3-Emissionen • mögliche Gefährdung der Oberflächengewässer
Human- und Ökotoxizität	• geringere SO_2-Emissionen • geringere Meeresverschmutzung durch Exploration und Transport von Rohöl • geringere Verschmutzung durch Leckagen nach Unfällen • geringere Toxizität und bessere Bioabbaubarkeit	• mögliche Belastung von Oberflächengewässern durch Pestizide • mögliche Belastung des Grundwassers durch Nitrat

Aus der Auseinandersetzung mit den Kriterien bestehender und in Entwicklung befindlicher Systeme, Vorschlägen aus den Niederlanden und Großbritannien sowie wichtiger Beiträge von Seiten verschiedener Nicht-Regierungsorganisationen (NGOs) wurden in der deutschen Diskussion ökologische und sozio-ökonomische Prinzipien herausgearbeitet, die sicherstellen sollen, dass Rohstoffe für die Biokraftstoffproduktion nachhaltig hergestellt werden:

1. Ein deutlicher Beitrag zur Treibhausgasminderung muss gegeben sein.
2. Minimierung negativer Folgen von indirekter Landnutzungsänderung und Ausgleich konkurrierender Landnutzungen.
3. Ausschluss des Verlusts von Lebensräumen mit hohem Naturschutzwert (HNV)
4. Ausschluss des Verlusts von Biodiversität
5. Negative Auswirkungen auf Böden, Wasser und Luft sind zu minimieren.
6. Die lokale Bevölkerung soll keine Nachteile erleiden, sondern an den Chancen des Biomasseanbaus partizipieren.
7. International anerkannte Standards für Arbeitsbedingungen werden eingehalten.
   (Quelle: IFEU)

Ein Blick in die Zukunft der Biokraftstoffe

Nicht nur ökologisch müssen Bioenergieträger konkurrenzfähig sein. Auch die Kosten müssen sich mit denen der fossilen Kraftstoffe vergleichen lassen. Es ist nicht verwunderlich, dass Biokraftstoffe derzeit teurer sind als herkömmliche Kraftstoffe. Bei Raps, Weizen oder Zuckerrüben muss die gesamte landwirtschaftliche Produktion finanziert werden – und natürlich auch alle weiterverarbeitenden Schritte. Das kann auch durch den Erlös aus dem Verkauf der Nebenprodukte, etwa des als Futtermittel verkauften Rapsextraktionsschrotes und des Glyzerins bei der Biodieselproduktion, nicht mehr kompensiert werden.

Heute sind die Herstellungskosten daher deutlich höher als die Kosten der konventionellen Dieselherstellung. Erst durch eine Mineralöl- und Ökosteuerbefreiung konnte Biodiesel auf dem Markt gegenüber dem normalen Diesel bestehen. Von Anfang 2004 bis Ende 2006 waren in Deutschland alle Biokraftstoffe – ob als Reinkraftstoffe oder als Beimischung zu fossilen Kraftstoffen – steuerbefreit, so dass auch Bioethanol, das höhere Produktionskosten als Biodiesel hat, wirtschaftlich attraktiv wurde.

Seit 2007 hat sich die Gesetzeslage geändert. Mit dem **Biokraftstoffquotengesetz** wurde die Mineralölwirtschaft verpflichtet, einen – jährlich ansteigenden – Mindestanteil an Biokraftstoffen Benzin und Diesel beizumischen. Diese beigemischten Biokraftstoffmengen

Junge Ölpalmenplantage: Neupflanzung nach der Rodung von Naturwald

sind nicht mehr von der Mineralölsteuer befreit. Bestimmte Reinkraftstoffe, beispielsweise reines Bioethanol oder BtL (Biomass-to-Liquid) sind auch weiterhin steuerbefreit, während Biodiesel einem reduzierten, allmählich ansteigenden Steuersatz unterliegt.

Die Gründe für die Förderung von Biokraftstoffen sind vielfältig. Eine lebensfähige Landwirtschaft, ein Beitrag zur Sicherheit der Versorgung, die Schaffung von Arbeitsplätzen und nicht zuletzt ihr Beitrag, um unsere Verpflichtungen zur Senkung der Treibhausgasemissionen zu erfüllen. Das Potenzial allein durch eine Bewirtschaftung der stillgelegten Flächen liegt bei 1,2 % bis 5 % des Gesamtverbrauchs an Erdölprodukten. Jedoch sind Biokraftstoffe nicht unbedingt an die landwirtschaftliche Fläche gekoppelt. Organische Abfälle wie Öle und Fette sowie holzartige Rohstoffe können ebenfalls herangezogen werden. Betrachtet man im Vergleich dazu das prognostizierte Wachstum des Verkehrs in den nächsten Jahren, so könnten Biokraftstoffe auf jeden Fall die Mehr-Emissionen des Zuwachses auffangen.

Drei Einflussfaktoren bestimmen die Wirtschaftlichkeit in hohem Maße: die Rohstoffkosten, die erzielbaren Preise für Nebenprodukte und der Erdölpreis. Einerseits lässt sich über die Zeit durch Züchtungserfolge der Ertrag von Energiepflanzen steigern und dadurch die Rohstoffkosten senken. Andererseits ist es in der Vergangenheit zu einer drastischen Verteuerung des Energieträgers Rohöl gekommen. Dieser Trend wird sich aufgrund der begrenzten Ressourcen langfristig fortsetzen. Beide Effekte, zusammen mit der wachsenden Erfahrung bei der Herstellung von Biokraftstoffen, tragen dazu bei, die Kosten für die Bereitstellung von Biokraftstoffen zu senken.

Andererseits können hohe politische Zielvorgaben, wie etwa das Ziel der EU, im Jahr 2020 einen 10%-igen Biokraftstoffanteil zu erreichen, zu einer unmittelbareren Verbindung zwischen Energiepreisen und Preisen für Agrarrohstoffe führen. In diesem Fall ist zu erwarten,

→ Auf den Teller oder in den Tank?

Biomasse wird derzeit in erster Linie zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion angebaut: Lediglich 5 % der weltweiten Ölpflanzen- bzw. Getreideproduktion werden zur Herstellung von Biodiesel bzw. Bioethanol verwendet. Dennoch wurden Biokraftstoffe in der jüngsten Vergangenheit für steigende Nahrungsmittelpreise und die zunehmende Anzahl der Hungernden (mit)verantwortlich gemacht.

Die Tatsache, dass weltweit mehr als 900 Millionen Menschen nicht genügend zu essen haben, ist jedoch in erster Linie ein Verteilungsproblem, denn eigentlich werden global betrachtet genügend Nahrungsmittel produziert. Abgesehen von den Hungernden, die tatsächlich mit Nahrungsmittelknappheit zu kämpfen haben, leiden viele Menschen in Entwicklungs- und Schwellenländern unter steigenden Nahrungsmittelpreisen, da sie einen immer größeren Teil ihres Einkommens für die Ernährung aufwenden müssen.

Die Ursachen für die steigenden Nahrungsmittelpreise wiederum sind sehr vielschichtig und nicht alleine auf die steigende Nachfrage bei Biokraftstoffen zurückzuführen. Vielmehr scheint es sich um ein Zusammenspiel aus rekordverdächtig niedrigen weltweiten Lagerbeständen, schlechten Ernten in Australien, der Ukraine und Europa, vernachlässigter Entwicklung der Landwirtschaft, erhöhtem Konsum von Fleisch- und Milchprodukten in Indien und China, hohem Ölpreis und vor allem Marktspekulation zu handeln. Wie groß der Einfluss der Biokraftstoffe letztendlich ist, vermag niemand präzise zu sagen.

dass sich der oben skizzierte langfristige Trend hin zu günstigeren Preisen für Agrarrohstoffe abschwächt oder sogar umgekehrt. Verbraucher müssten dann eventuell auf lange Sicht mit steigenden Preisen für Nahrungsmittel rechnen.

Im Jahr 2003 hat die Europäische Kommission die Verwendung von Biokraftstoffen per Richtlinie europaweit gesetzlich verankert. Die Mitgliedsstaaten wurden verpflichtet, in zwei Stufen für Mindestanteile an Biokraftstoffen im Verkehrssektor zu sorgen. Mit der neuen Erneuerbaren-Energien-Richtlinie, die im Juni 2009 in Kraft getreten ist, wird das **Ziel** festgeschrieben, dass in den Mitgliedsstaaten im Jahr 2020 schon **10 % des Energiebedarfs des Verkehrssektors** aus erneuerbaren Energien stammen soll. Dies sind im wesentlichen Biokraftstoffe, aber auch aus erneuerbaren Energieträgern erzeugter Strom für Elektroautos.

Die Bundesregierung hat angesichts der intensiven Debatte über Flächenkonkurrenzen des Biokraftstoffanbaus die ursprünglichen, äußerst ambitionierten Ziele für Biokraftstoffe zurückgenommen. Derzeit wird ein Anteil von rund 12 % für das Jahr 2020 angestrebt. Der Anteil soll überwiegend über die Beimischung von Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen und nur zu einem kleinen Teil durch biogene Reinkraftstoffe erreicht werden.

Die Potenziale für eine Biokraftstoffproduktion hängen allerdings stark von der Zukunft der deutschen Landwirtschaft ab. Auch andere Entwicklungen, die aus Nachhaltigkeitssicht wünschenswert sind, beanspruchen Fläche – etwa die Extensivierung der Landwirtschaft im Ökolandbau oder die Umsetzung von Kompensationsflächen und Biotopverbünden (siehe S. 41).

Die Nutzung der biogenen Reststoffe und Energiepflanzen für die Kraftstoffherstellung steht zudem in einer Konkurrenz zu CO_2-Einsparungen, die mit diesen Stoffen in anderen Sektoren erzielt werden können. Die Verfeuerung von Biomasse in effizienter Kraft-Wärme-Kopplung trägt beispielsweise stärker zum Klimaschutz bei als die Nutzung als Kraftstoff.

Langfristig wird sich die Flächensituation aufgrund steigender spezifischer Erträge in der Landwirtschaft und sinkender Bevölkerungszahlen entspannen. Dem Import von Biomasse – als Rohstoff wie auch als fertiger Bioenergieträger – könnte eine verstärkte Bedeutung zukommen.

Allerdings ist die vorrangige **Ausschöpfung der Effizienzpotenziale** insbesondere im Straßenverkehr – sowohl durch sparsame Fahrzeuge wie auch durch Verkehrsvermeidung und -verlagerung – eine unabdingbare, robuste und kosteneffiziente Voraussetzung für das Erreichen hoher Anteile alternativer Kraftstoffe am Gesamtkraftstoffbedarf wie auch für die Erreichung der Klimaschutzziele insgesamt.

Infos zu Biokraftstoffen

- → Bio-Kraftstoff-Portal der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: www.bio-kraftstoffe.info
- → Union zur Förderung der Öl- und Proteinpflanzen e.V. (insbesondere Biodiesel): www.ufop.de
- → Bundesverband Biogene und Regenerative Kraft- und Treibstoffe e.V.: www.biokraftstoffe.org

GEOTHERMIE UND WÄRMEPUMPE – DIE ENERGIE AUS DEM ERDINNEREN UND AUS DER UMWELT

Die Fakten:

- **Erdwärme ist eine nach menschlichen Maßstäben unerschöpfliche Energiequelle.**
- **Die erste Tiefengeothermieanlage Europas zur Stromerzeugung nach dem Hot-Dry-Rock Verfahren ging 2008 in Betrieb und soll eine Leistung von drei Megawatt erreichen. Hierzu sind bis zu 5.000 Meter tiefe Bohrungen erforderlich.**
- **Wärmepumpen nutzen das geringe Temperaturniveau oberflächennaher Geothermie und Umweltwärme. Effizient und gut geplant können sie Wärme umweltschonender bereitstellen als herkömmliche Heiztechnik.**
- **Das Temperaturniveau von Erdwärmeanlagen eignet sich neben der Stromproduktion in erster Linie zur Gebäude- und Wassererwärmung. Die Wärme muss über Nahwärmenetze verteilt werden.**

Wärmepumpe, Turbinenanlage in einem Geothermiekraftwerk, hydrothermale Geothermie

Geothermie – auch Erdwärme genannt – ist die Hitze, die vom schmelzflüssigen Kern im Erdinneren an die Erdoberfläche dringt. Die Energie aus dem Erdkern erhitzt auf ihrem Weg nach oben sowohl Gesteins- und Erdschichten als auch unterirdische Wasserreservoirs. An manchen Stellen dringen heißes Wasser und Dampf als heiße Quelle oder Geysir bis an die Erdoberfläche. Je tiefer man in das Innere der Erde vordringt, umso wärmer wird es. In Mitteleuropa nimmt die Temperatur im Mittel um 3 °C pro 100 m Tiefe zu. Im obersten Erdmantel – 40 bis 400 Kilometer unter der Oberfläche – herrschen Temperaturen von etwa 1.300 °C. Im Erdkern – etwa 5.100 bis 6.370 km tief – sind es wahrscheinlich 5.000 °C.

Die in der Erde gespeicherte Wärme ist nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich. Aus den Tiefen unseres Planeten steigt täglich ein Mehrfaches des weltweiten Energiebedarfs auf und macht sich ungenutzt in den Weltraum davon. Der größte Teil dieses Wärmestroms stammt vom ständigen Zerfall radioaktiver Elemente im Erdmantel und in der Erdkruste, ein Vorgang, der noch Milliarden Jahre anhalten wird. Ein kleinerer Teil ist gespeicherte Restwärme, die bei der Erdentstehung freigesetzt wurde. Diese Energieressource lässt sich praktisch überall nutzen.

Um die Wärme aus dem Untergrund zu gewinnen, braucht man eine Flüssigkeit für den Wärmetransport. Das grundlegende Prinzip ist einfach: entweder ist dieses Transportmittel in Form von Dampf oder heißem Wasser bereits im Untergrund vorhanden – dann wird es an die Oberfläche befördert, ausgekühlt und normalerweise wieder in den Untergrund zurückgeschickt. Oder

Geothermie-Vorkommen in Deutschland

die Flüssigkeit muss erst in die Tiefe gepumpt und erhitzt wieder nach oben gebracht werden.

Die gewonnene Wärme lässt sich unmittelbar zur Beheizung von Gebäuden oder anderer Wärmeverbraucher einsetzen. Attraktiv ist aber auch die Verwendung der Erdwärme zur Stromerzeugung, da die Erdwärme rund um die Uhr zur Verfügung steht. Erdwärmekraftwerke könnten also einen wichtigen Beitrag zur Grundversorgung mit erneuerbarem Strom leisten.

Auch bei der geothermischen Stromerzeugung fallen große Mengen von Wärme an. Diese kann meist nur dann genutzt werden, wenn die Gebäude in der Umgebung über ein Nahwärmenetz beheizt werden. Eine stark zunehmende Verbreitung von Nahwärmenetzen ist daher eine entscheidende Voraussetzung für die technische Erschließung des großen Potenzials der Geothermie. Dafür gibt es fünf verschiedene Verfahren.

Hot-Dry-Rock-Verfahren

Heiße, trockene Gesteinsschichten (Hot dry rock, HDR) in bis zu fünf Kilometer Tiefe lassen sich zur geothermischen **Strom- und Wärmeerzeugung** nutzen. Um die Wärme der meist kristallinen Gesteine wie Marmor oder Granit an die Erdoberfläche zu bringen, müssen sie von einem Wärmeträger durchspült werden. Würde man Wasser ohne weitere Maßnahmen durch die Schichten pressen, wären die Wärmeaustauschfläche und die Durchlässigkeit der Steinschichten viel zu gering. Daher wird zuerst eine Tiefbohrung angelegt, aus der sehr viel Wasser unter sehr hohem Druck durch das Gestein gepresst wird. Dabei werden natürlich vorhandene Risse und Spalten aufgeweitet, geschert und neue Risse erzeugt ("hydraulische Stimulation"). Das Resultat: Die Durchlässigkeit des Gesteins steigt und man erzeugt einen "natürlichen Wärmetauscher".

Zum Betrieb einer HDR-Anlage wird dann kaltes Wasser in die Injektionsbohrung gepumpt und über eine zweite (Produktions-) Bohrung wieder an die Oberfläche geführt. Das in den heißen Tiefengesteinen erhitzte Wasser kann zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen und zur Bereitstellung von Industriedampf genutzt werden. Besonders attraktiv ist es, aus dem Geothermalwasser Strom zu erzeugen. Dazu werden sogenannte ORC-Turbinen (Organic Rankine Cycle, ORC) eingesetzt, die im Wesentlichen wie Dampfturbinen arbeiten. Allerdings ist es bei den vergleichsweise geringen Temperaturen des Wärmeträgers (100 bis maximal 180 °C) notwendig, anstelle von Wasser im Dampfturbinenkreislauf eine organische Flüssigkeit mit niedrigem Siedepunkt wie Propan oder Iso-Butan einzusetzen. Der elektrische Wirkungsgrad des Verfahrens liegt bei 8 bis 12 %.

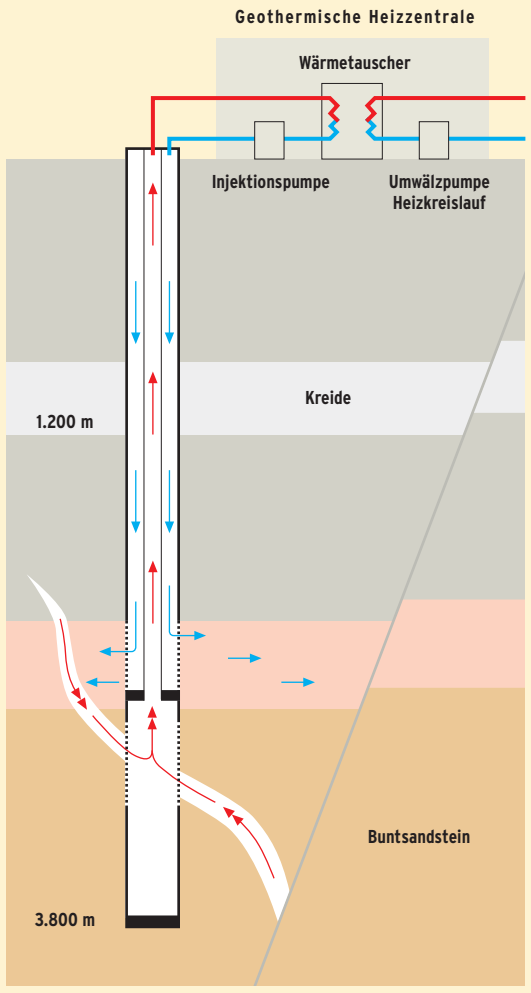
Kristalline Gesteinsschichten gibt es in Deutschland nahezu überall. 95 % des geothermischen Potenzials wird daher der HDR-Technik zugeordnet. Es ist ausreichend, um die gesamte Grundlast des deutschen Strombedarfs zu decken.

Dass dieses Potenzial nicht erschlossen wird, liegt bisher an den hohen Kosten der HDR-Technik. Allein für eine Bohrung bis 5.000 m Tiefe veranschlagt man mehrere Millionen Euro. Wegen der hohen Bohrkosten werden Standorte bevorzugt, an denen in vergleichsweise geringer Tiefe kristallines Gestein und hohe Temperaturen zu finden sind. Dies ist insbesondere im Oberrheingraben der Fall. Insgesamt belaufen sich die Investitionskosten für eine HDR-Anlage dort auf etwa 2.500 bis 5.000 Euro pro Kilowatt. Die Stromgestehungskosten liegen – bei beinahe kontinuierlichem Betrieb mit 8.000 Volllaststunden pro Jahr – bei etwa 7 bis 15 Cent/kWh. HDR- bzw. petrothermale Systeme, die tiefliegende Wärmereservoirs nutzen, die keine oder nur eine geringe Wasserführung aufweisen, werden daher im Erneuerbare-Energien-Gesetz mit einem erhöhten Bonus gefördert.

In einem Forschungsprojekt im elsässischen Soultz sous Forêts (Oberrheingraben) wurden drei Bohrungen bis auf 5.000 m abgeteuft, bei denen die Wissenschaftler auf Temperaturen von über 200 °C stießen. Im Juni 2008 nahm eine ORC-Anlage den Probebetrieb auf, die künf-

Geothermie-Kraftwerk Landau – ein hydrothermales System mit hohem Temperaturangebot

→ Energiegewinnung aus dichtem Tiefengestein



Grundprinzip der geothermischen Energiegewinnung aus dichtem Tiefengestein

tig mit einer elektrischen Leistung von 1,5 MW rund 1.500 Haushalte mit Strom versorgen wird. Ob eine zweite Anlage in Betrieb genommen werden kann, hängt von der förderfähigen Wassermenge und der Temperatur ab. Das Kraftwerk ist die erste Anlage in Europa, die Strom mittels der HDR-Technik erzeugt. Ziel der Arbeiten ist, standardisierte und kostengünstige HDR-Anlagen zu entwickeln.

Hydrothermale Systeme mit hohem Temperaturangebot

Zur Strom- und Wärmeerzeugung kann auch heißes Wasser aus unterirdischen "Aquiferen" genutzt werden, wenn die geologischen Bedingungen stimmen. Für die **Stromproduktion** muss die Wassertemperatur 100 °C überschreiten und es müssen ausreichende Thermalwassermengen zur Verfügung stehen. In einigen europäischen Ländern wie Island und Italien finden sich solche Wasservorkommen schon in moderaten Tiefen. In Deutschland muss man hingegen 4.000 Meter tief bohren, um auf ausreichende Temperaturen und Wassermengen zu stoßen. Und auch das nur an ausgesuchten Standorten des Oberrheintalgrabens und im bayerischen Voralpenraum. In Deutschland entfallen 5 % des geothermisch nutzbaren Potenzials auf solche hydrothermalen Systeme. Das heiße Wasser treibt dabei eine Dampfturbine an und wird nach Möglichkeit für weitere Wärmeverbraucher wie Haushalte oder Industriebetriebe genutzt. Das abgekühlte Wasser wird anschließend über eine zweite Bohrung wieder in die Tiefe gebracht. Andernfalls würde die unterirdische Wärmequelle schneller versiegen und das hochmineralisierte Thermalwasser müsste aus Gründen des Umweltschutzes in anderen unterirdischen Lagern entsorgt werden.

Das erste deutsche Geothermiekraftwerk ist seit November 2003 in Neustadt-Glewe bei Schwerin in Betrieb. Dort wurde eine schon seit 1995 bestehende hydrothermale Wärmeerzeugung durch die Stromerzeugung mit einer 210 kW ORC-Turbine ergänzt.

Im pfälzischen Landau produziert seit Ende 2007 eine 3 MW ORC-Turbine Strom für 6.000 Haushalte. Durch den hier zu findenden Temperaturgradient von knapp 5 °C pro 100 m Tiefe findet man schon in 2.500 Meter Tiefe Wassertemperaturen von 150 °C. Überschüssige Wärme versorgt vorerst 300 Haushalte mit warmem Wasser für die Heizung. Zukünftig sollen 1.000 Haushalte angeschlossen werden.

Ein weiteres Kraftwerk mit einer Leistung von 3.360 kW ging Mitte 2008 in Unterhaching, Bayern, in Betrieb. Anders als bei den genannten Kraftwerken arbeitet dieses mit der so genannten Kalinatechnik, die als Arbeits-

Die Abschlüsse der Bohrungen im Geothermiekraftwerk Landau

ORC-Anlage in einem Geothermie-Kraftwerk

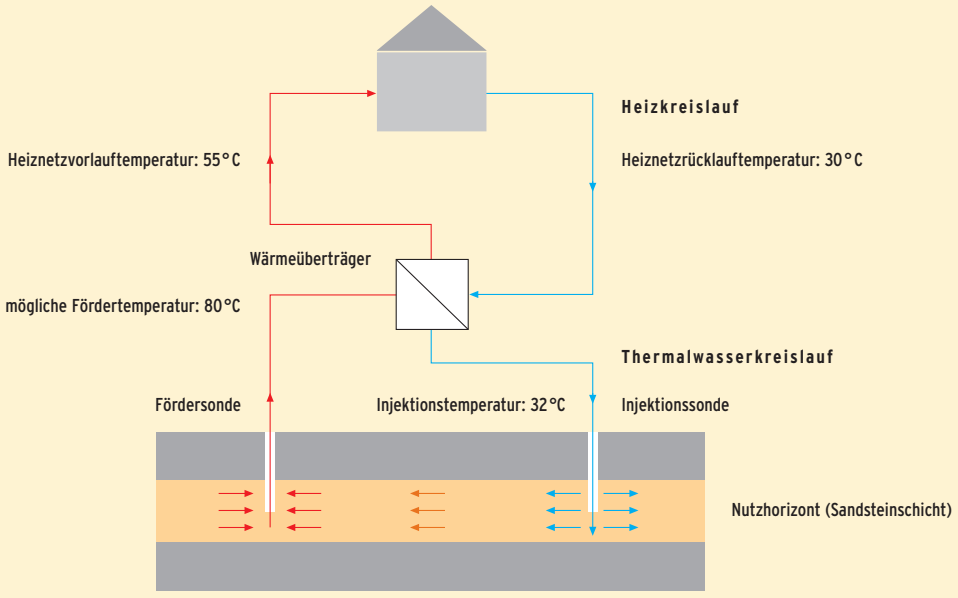
medium ein Ammoniak-Wasser-Gemisch verwendet. Die Bohrung liefert pro Sekunde 150 Liter Thermalwasser bei einer Temperatur von über 120 °C und versorgt zusätzlich 2.000 Wohnungen mit Wärme.

Hydrothermale Systeme mit niedrigem Temperaturangebot

In anderen Regionen Deutschlands, vor allem im so genannten süddeutschen Molassebecken (Malmkarst), im Oberrheintalgraben, in der Schwäbischen Alb und in Teilen der norddeutschen Tiefebene, liegt das erschließbare Temperaturniveau der Tiefengewässer zwischen 40 °C und 100 °C. Das reicht nicht immer zur Stromerzeugung. Diese Erdwärme wird stattdessen zur **Gebäude- und Wasserheizung**, in Thermalbädern und zu gewerblichen Zwecken wie der Beheizung von Gewächshäusern genutzt. In Süddeutschland, vor allem in dem Landstrich zwischen der Donau und den Alpen, kann das Thermalwasser nach dem Abkühlen auch als Trinkwasser verwendet werden. Hier fließt unterirdisch genügend Wasser nach und der Mineralgehalt ist gering.

Im bayerischen Pullach wurde nach einer Bohrzeit von nur 42 Tagen in 3.300 m Tiefe Thermalwasser mit einer Temperatur von 94 °C gefunden. Bei der zweiten Bohrung wurden 107 °C erreicht. Inzwischen versorgen die Bohrungen über 700 Wohneinheiten mit Wärme.

→ Thermalwasser



Förderung und Nutzung von Thermalwasser

Die Investitionskosten einer hydrothermalen Heizzentrale liegen bei Anlagen mit einer installierten Leistung zwischen 3 und 30 MW im Bereich von 400 bis 1.000 Euro pro Kilowatt. Dazu kommen meist noch Kosten für die Leitungen und Verteilstationen eines Wärmenetzes. Je nach Temperaturniveau und Ergiebigkeit der Quelle können die Wärmegestehungskosten zwischen 2 und 4 Cent/kWh liegen. Dabei geht man von einer Auslastung mit 2.500 bis 3.000 Volllaststunden vor allem in der kalten Zeit des Jahres aus. Bei industriellen Abnehmern mit hoher Auslastung (über 5.000 h/a) können die Wärmekosten unter 2 Cent/kWh sinken.

In Deutschland wird die hydrothermale Geothermie schon seit langem genutzt. Im Jahr 2008 wurden etwa 160 GWh geothermischer Wärme (ohne Thermalbäder) bereitgestellt.

Tiefe Erdwärmesonden

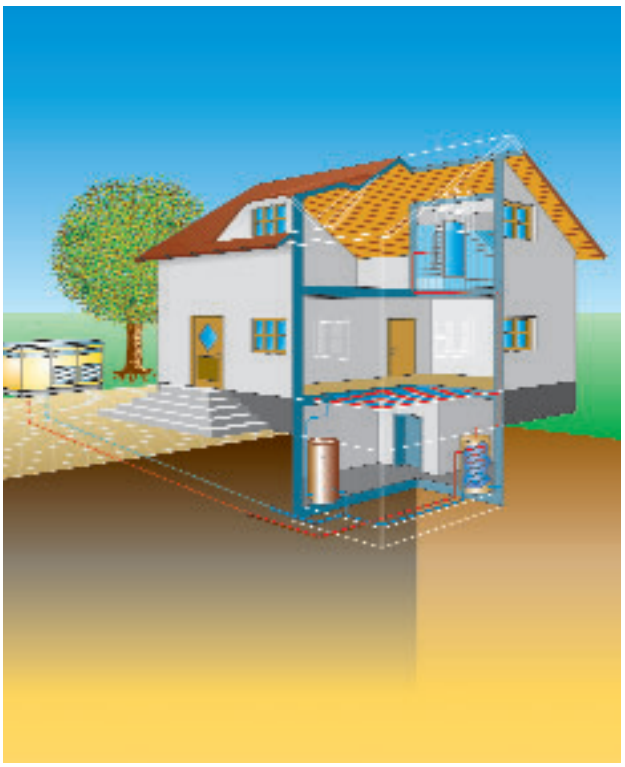
Vorhandene Tiefbohrungen, die zur Prospektion von Erdgas, Erdwärme oder möglichen Endlagerstätten angelegt wurden, können ebenfalls zur geothermischen Energiebereitstellung verwendet werden. 5.000 bis 7.000 solcher Bohrungen soll es allein in Deutschland geben. In die Tiefbohrungen werden sogenannte Doppelrohrsonden bis zu 4 km tief in das Bohrloch eingeführt. Durch diese Sonden zirkuliert Wasser in einem geschlossenen Kreislauf. In der Tiefe wird es erwärmt; an der Erdoberfläche wird die Wärme an einen Wärmepumpenkreislauf abgegeben (siehe “Prinzip der Wärmepumpen”).

Das technische Potenzial solcher Sonden liegt in Deutschland bei etwa 800 Mrd. kWh/a. Die Wärmeleistung je Sonde ist jedoch viel geringer als die einer etwa gleich teuren hydrothermalen Bohrung. Günstige wirtschaftliche Verhältnisse ergeben sich daher nur, wenn ein vorhandenes Bohrloch genutzt werden kann.

Umweltfolgen der tiefen Geothermie

Während die Umweltauswirkungen der Bohrlocherstellung vergleichbar sind mit denen der Bohrungen für die Gewinnung von Erdöl und -gas, kann es im Betrieb zu einer leichten Abkühlung des Untergrundes und dadurch zu Veränderungen in der Chemie der Umgebung kommen. Jedoch besteht in der Regel keine Verbindung zur Biosphäre, weshalb keine Umwelteffekte auf Flora und Fauna zu erwarten sind.

Durch die hydraulische Stimulation und Auskühlung kann es in seismisch labilen Gebieten zu kleineren Erdbeben kommen. Studien und praktische Erfahrung zeigen jedoch, dass kaum ein praktisches Gefahrenpotenzial besteht, da die labilen Zonen vorher identifiziert und Gegenmaßnahmen getroffen werden können und da außerdem die Stärke möglicher seismischer



Luft als Wärmequelle für eine Wärmepumpe

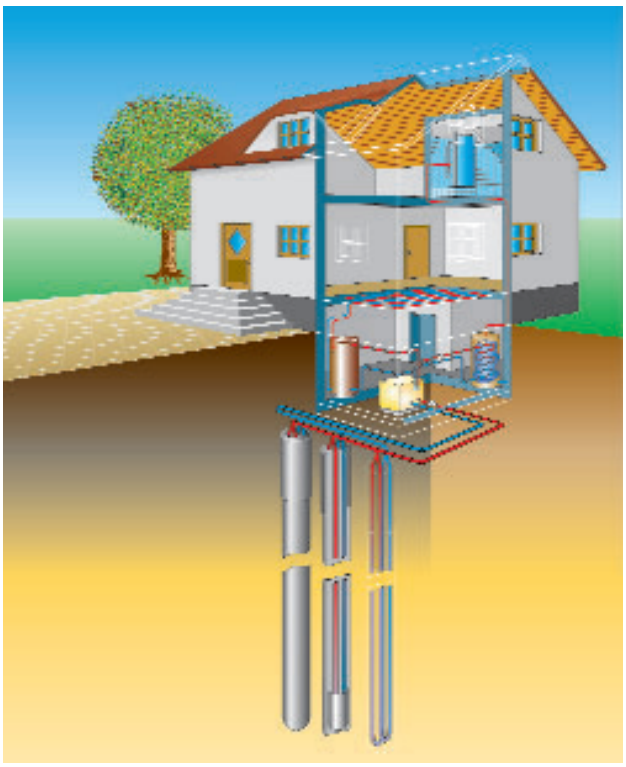
Aktivität sehr gering ist. Die eigentliche Ursache solcher Beben sind natürliche tektonische Spannungen. Um die Umweltauswirkungen der tiefen als auch der oberflächennahen Geothermie zu minimieren, ist eine genaue Kenntnis des geologischen Untergrundes erforderlich.

Die Wärmepumpe

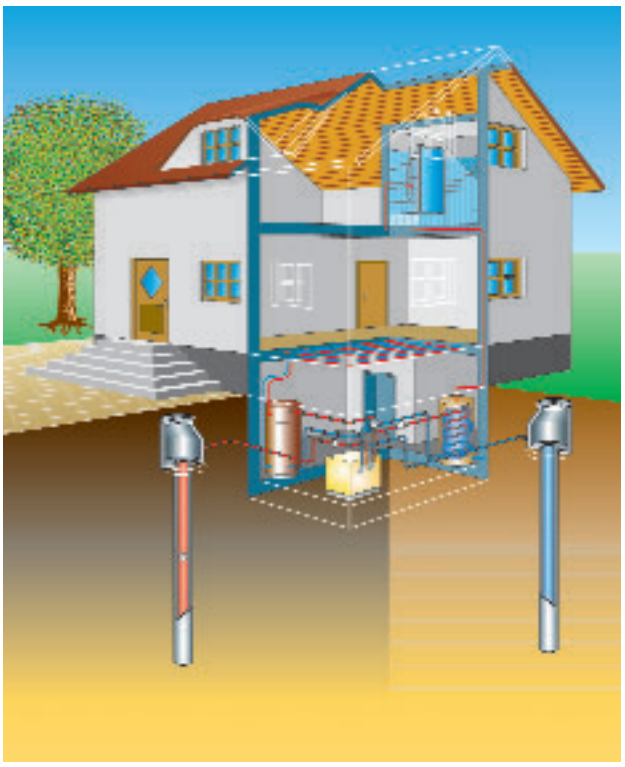
Bei der sogenannten oberflächennahen Geothermie wird die Wärme der obersten Erdschichten oder des Grundwassers genutzt. Bis in Tiefen von 20 Meter haben dabei noch Umwelteinflüsse wie Sonnenstrahlung und Regenwasser einen Einfluss auf die Temperatur der Bodenschichten. Diese Wärme kann von Wärmepumpen genutzt werden.

Eine Wärmepumpe ist nicht geheimnisvoller als ein Kühlschrank. Beim Kühlschrank wird die Wärme dem Kühlfach entzogen und im Wärmetauscher auf der Rückseite des Geräts wieder abgegeben. Bei der Wärmepumpe wird der Prozess umgedreht: Die Wärme wird meist dem Erdreich im Vorgarten entzogen und an das Heizungssystem des Hauses abgegeben.

Zur Wärmeversorgung von Gebäuden werden bis zu 150 m tiefe Löcher gebohrt, in die mit Flüssigkeit (Sole) durchflossene Rohre eingebaut werden. Da diese Bohrungen sehr teuer sind und eine wasserrechtliche Genehmigung erfordern, können die Erdkollektoren auch horizontal in ein bis zwei Meter Bodentiefe in Form von Schlaufen verlegt werden. Hier sinken die Temperaturen



Erde als Wärmequelle für eine Wärmepumpe



Wasser als Wärmequelle für eine Wärmepumpe

auch im Winter kaum unter 5 °C. Dass sie nicht so hohe Temperaturen wie Tiefbohrungen erreichen, wird durch deutlich längere Leitungen kompensiert. Der Flächenbedarf eines so verlegten Erdkollektors beträgt das ein- bis anderthalbfache der zu beheizenden Wohnungsfläche.

Eine weitere Wärmequelle für Wärmepumpen ist Umgebungsluft. Der Vorteil liegt darin, dass Luft überall und jederzeit verfügbar ist und kostengünstig erschlossen werden kann. Nachteilig ist, dass die Umgebungsluft immer dann am kältesten ist, wenn der Wärmebedarf am höchsten ist – nämlich im Winter. Das mindert den Ertrag der Wärmepumpe. Bei Sonden kann der so genannte Temperaturhub der Wärmepumpe über das Jahr relativ konstant gehalten werden, der Energieeinsatz bleibt niedrig. Die so genutzte Energie des Erdreiches stammt – auch bei den Erdsonden – weitgehend aus der Umgebung, deren mittlere Temperatur durch die jährliche Sonneneinstrahlung bestimmt wird.

Die Nutzung der Umgebungswärme mit Hilfe von Wärmepumpen unterscheidet sich in einem Punkt wesentlich von anderen erneuerbaren Energien. Die Wärmepumpe braucht zum Antrieb einen erheblichen Anteil an **Fremdenergie**. Je nach äußeren Bedingungen kann diese 25 bis 50 % der Energie ausmachen, die als Wärme genutzt wird. Man ordnet daher diese Technologie auch dem Bereich der **rationellen Energienutzung** zu, sieht Wärmepumpen also eher in einer Reihe mit sparsamen Heizkesseln. Aber auch zu diesen Techniken besteht ein wesentlicher Unterschied: Denn Wärmepumpen nutzen nicht nur die ihnen zum Antrieb zugeführte Energie, sondern zusätzlich auch erneuerbare Energie aus der Umgebung. Entscheidend ist, ob der erneuerbare Anteil überwiegt. Wärmepumpen sind darum ein Zwitter aus sparsamem, konventionellem Energieeinsatz und erneuerbaren Energien. Das Verhältnis von erzeugter Wärme zu eingesetzter Fremdenergie heißt “Arbeitszahl”.

Es gibt verschiedene technische Ausführungen von Wärmepumpen. Am weitesten verbreitet sind so genannte **Kompressionswärmepumpen**. Kleine Ausführungen zur Brauchwassererwärmung und Heizung von Einfamilienhäusern werden meist von Elektromotoren angetrieben, größere Anlagen auch von Gasmotoren. Daneben gibt es Wärmepumpen, bei denen keine mechanische, sondern thermische Antriebsenergie benötigt wird. Diese so genannten Sorptionswärmepumpen können mit Gas, Öl, aber auch mit Ab- und Solarwärme betrieben werden. Sie haben den Vorteil eines hohen Wirkungsgrades in Bezug auf die eingesetzte Primärenergie. Sorptionswärmepumpen kleiner Leistung sind allerdings erst in der Entwicklungsphase.

Soll die bereitgestellte Wärme zu Heizzwecken verwendet werden, so sind niedrige Vorlauftemperaturen im Heizungssystem vorteilhaft. Kann die Vorlauftemperatur um ein Grad abgesenkt werden, so benötigt die Wärmepumpe bereits 1 % weniger Antriebsenergie. Darum sollte man Wärmepumpen mit Fußboden- oder Wandheizungen kombinieren.

Kosten und Potenziale der Wärmepumpe

Beim Neubau eines gut gedämmten Einfamilienhauses liegen die Anschaffungskosten einer Wärmepumpe bei 11.000 Euro. Hinzu kommen bis zu 9.000 Euro für die Erdsonden, so dass die Investitionskosten für die gesamte Wärmepumpenanlage bei etwa 20.000 Euro liegen. Im Altbau muss mit höheren Kosten gerechnet werden, da hier aufgrund des höheren Wärmebedarfs auch eine größere Wärmepumpe erforderlich ist. Daneben müssen Kosten für Umbauten einkalkuliert werden, um die Vorlauftemperatur im Heizungssystem zu senken. Wie hoch die daraus resultierenden Wärmekosten sind, hängt von den Sondertarifen des Stromversorgers für elektrische Wärmepumpen ab. Die spezifischen Kosten je Kilowattstunde Wärme bewegen sich zwischen 15 und 20 Cent/kWh.

Nach einem Boom Anfang der achtziger Jahre, als aufgrund hoher Ölpreise der Betrieb von Wärmepumpen wirtschaftlich erschien, ging die Nachfrage stark zurück. Seit Anfang der neunziger Jahre hat jedoch eine Erholung der Nachfrage eingesetzt – nicht zuletzt durch die verstärkten Vermarktungsanstrengungen der Elektrizitätsversorger. Die Wiederaufnahme besonders effizienter Wärmepumpen ins Marktanreizprogram der Bundesregierung lässt eine weitere steigende Nachfrage erwarten.

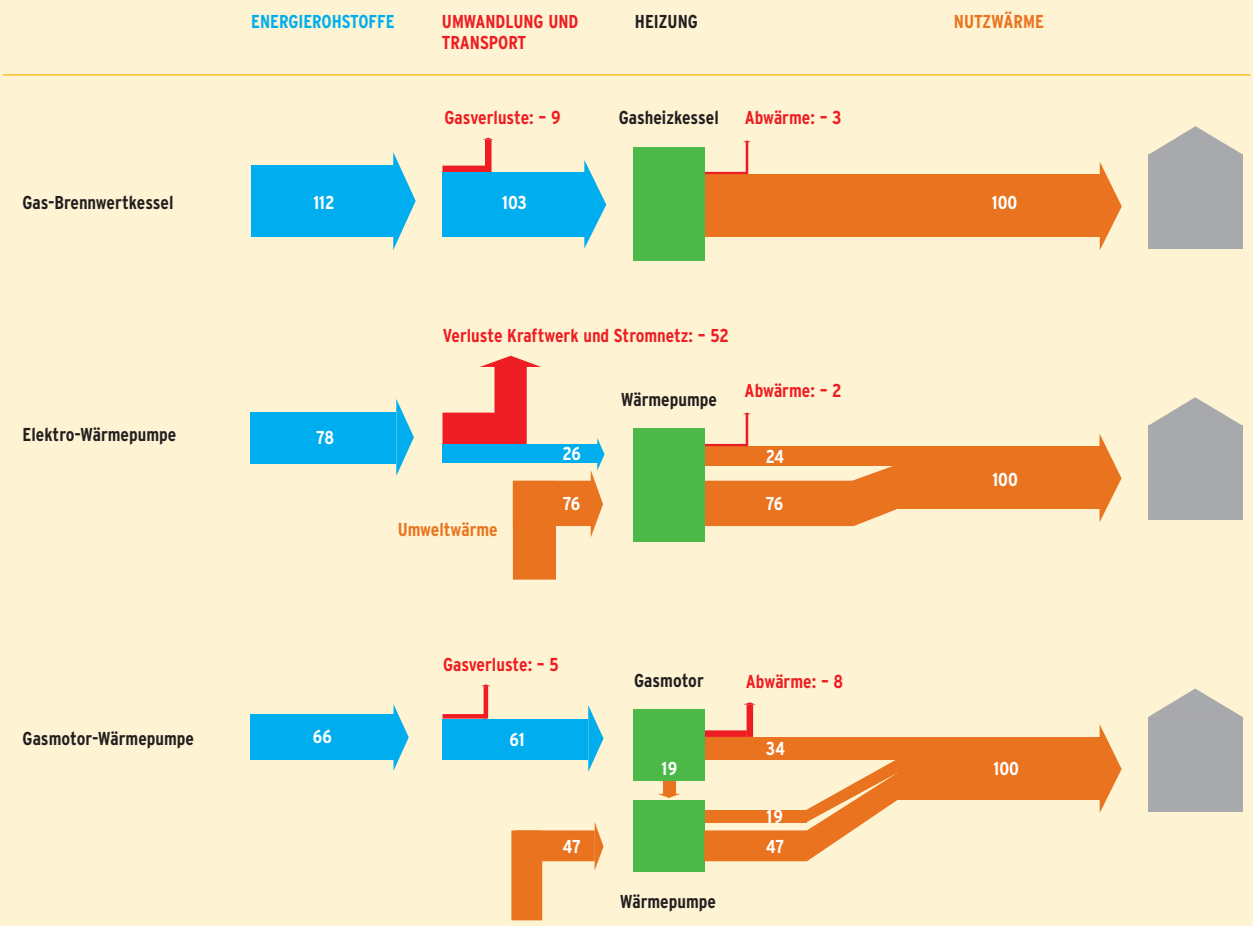
Bis Ende 2008 waren in Deutschland knapp 350.000 Wärmepumpen installiert, wovon allein 2008 knapp 62.500 neu eingebaut wurden. Mehr als die Hälfte aller Wärmepumpen entziehen die Wärme dem Erdreich oder dem Grundwasser. Die verbleibenden nutzen Umweltwärme.

Ökobilanz der Wärmepumpe

Zum Betrieb der Wärmepumpe muss erhebliche Fremdenergie eingesetzt werden. Für die energetische Bewertung ist es darum wichtig, das Verhältnis von eingesetzter Energie zu Nutzenergie zu ermitteln und die gesamte Kette von der Energiequelle bis zur Nutzung in der Wärmepumpe zu betrachten. Wird Strom als Fremdenergie eingesetzt, ist es wegen der Verluste der Strom-

→ Energiebilanz Wärmepumpe

Quelle: DLR



Energieflüsse und Nutzungsgrade verschiedener Wärmesysteme im Vergleich mit einem Gas-Brennwertkessel. In den Berechnungen wird von einer Elektro-Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von rund 4 ausgegangen.

Wärmepumpen einiger Baureihen besitzen ein Design, das sich problemlos in die Inneneinrichtung eines Hauses, beispielsweise in Küchenzeilen, einfügen lässt

erzeugung (derzeit rund zwei Drittel der eingesetzten Primärenergie) erforderlich, mit der eingesetzten Antriebsenergie mindestens den dreifachen Wärmeertrag zu liefern. Andernfalls ist der Einsatz fossiler oder nuklearer Primärenergie größer als die erzeugte Wärmemenge. Dieses als Arbeitszahl bezeichnete Verhältnis bestimmt also, ob in der Gesamtbilanz erneuerbare Energie genutzt wird und die Pumpe sich energetisch rechnet. Da die Verluste in der Gasversorgung geringer als in der Stromversorgung sind und insbesondere die Verluste in den Kraftwerken entfallen, beträgt die notwendige Jahresarbeitszahl bei gasmotorbetriebenen Wärmepumpen nur 1,1 (Grafik “Energiebilanz Wärmepumpe”). Elektrisch betriebene Wärmepumpen sparen fossile Energieträger oder Kohlendioxid (CO_2) erst ab einer Jahresarbeitszahl von 3,0 ein. Die in der Praxis erzielbaren jährlichen Arbeitszahlen bei Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser erreichen oftmals nicht die versprochenen Werte. Feldtests zeigen, dass Luft-Luft-Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen im Mittel um die 3,0 erreichen, Grundwasser-Wärmepumpen rund 3,5 und Erdreich-Wärmepumpen 3,7. Entscheidend sind u.a. die Temperaturen des Heizsystems und die Qualität der Installation.

Der verstärkte Einsatz von elektrischem Strom im Wärmebereich ist allerdings angesichts der überwiegend auf fossilen Energieträgern basierenden Stromversorgung energiepolitisch problematisch. Mit zunehmendem Anteil von erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung an der zukünftigen Stromerzeugung wird aber auch aus ökologischer Sicht die Wärmepumpe zunehmend interessanter.

Forschung erforderlich

Um die Energiebereitstellung aus Erdwärme voranzubringen, ist eine intensive Forschung und Entwicklung erforderlich. Das gilt besonders für die Stromerzeugung und die Schaffung großer wärmetauschender Flächen im Untergrund (HDR-Verfahren) sowie die Verbesserung des ORC-Verfahrens. Die Bohrtechnik muss auf die Erfordernisse der Geothermie abgeglichen werden und die hydrothermalen Reservoire müssen besser erfasst werden.

Das Bundesumweltministerium fördert im Rahmen des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung mehrere Vorhaben im Bereich der tiefen Geothermie. In den verschiedenen geothermisch geeigneten Regionen Deutschlands sollen Anlagen zur geothermischen Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung gebaut werden. Zum Einsatz kommen je nach Standort Technologierichtungen wie das Hot-Dry-Rock-Verfahren, die Nutzung bestehender Tiefbohrungen und die Nutzung des heißen Wassers aus Aquiferen und Karstgebieten. Zusätzlich konzentriert sich die Forschung auf die Herstellung von hochfesten Materialien, Legierungen und Pumpen, welche den besonderen Eigenschaften des oft aggressiven Thermalwassers widerstehen können. Desweiteren wird an Planungswerkzeugen gearbeitet, die das Fündigkeitsrisiko bei Bohrungen minimieren sollen.

Auch elektromotorisch angetriebene Wärmepumpen werden weiter verbessert, um sie besser an den tatsächlichen momentanen Heizungsbedarf und die momentanen Temperaturen der Wärmequelle anpassen zu können und so eine höhere Effizienz zu erreichen.

Sorptionswärmepumpen kleiner Leistung stehen kurz vor der Markteinführung. Forschungsinstitute und Hersteller arbeiten besonders an der Langezeitstabilität dieser Systeme.

Infos zu Geothermie

→ Geothermische Vereinigung: www.geothermie.de

→ GeoForschungszentrum Potsdam: www.gfz-potsdam.de

Infos zu Wärmepumpen

→ Bundesverband Wärmepumpe: www.waermepumpe-bwp.de

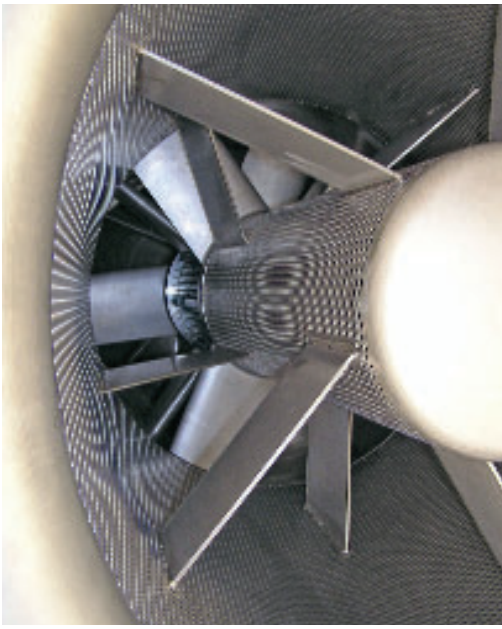
→ Feldtest Wärmepumpe: wp-effizienz.ise.fraunhofer.de

→ Schweizer Bundesamt für Energie: www.waermepumpe.ch

STROM AUS DEM MEER

Die Fakten:

- **Wellen, Brandung, Gezeitenströmungen, Tidenhub und Temperaturunterschiede der Ozeane lassen sich zur Stromerzeugung nutzen.**
- **Während in Deutschland Meeresenergie absehbar eine Nischenposition einnehmen wird, können strömungs-, gezeiten- und wellenreiche Regionen große Potenziale erschließen. Das weltweite Potenzial beträgt theoretisch bis zu 100.000 TWh pro Jahr für Wellen- und Gezeitenkraftwerke sowie 800.000 TWh pro Jahr für ozeanthermische Energie. Zum Vergleich: Der deutsche Stromverbrauch lag 2008 bei 615 TWh.**
- **Die Nutzung der Meeresenergie ist technisch anspruchsvoll, besonders hinsichtlich der Anbindung der Anlagen an das Stromnetz, der mechanischen Beanspruchung der Kraftwerke und der Wartung der Anlagen unter erschwerten Bedingungen.**



Gezeitenkraftwerk, Strömungskraftwerk SeaFlow und Wells-Turbine für OWC-Kraftwerke

Das Meer ist eine riesige und unerschöpfliche Energiequelle, und der Mensch kann Wellen, Tidehub und Strömung zur Stromerzeugung nutzen. Denn die Ozeane sind unser globaler Wärmepuffer und nehmen Sonnenenergie auf, speichern und transportieren die Wärme mit der Meeresströmung quer über den Globus, um sie in kühleren Regionen wieder abzugeben. Das Potenzial der Bewegungsenergie, Lageenergie und Wärmeenergie ist gewaltig: Allein die Wellen und Gezeitenströmung könnten theoretisch den weltweiten Strombedarf decken.

So unterschiedlich wie die Energiequellen des Meeres und ihre Ursachen sind, so unterschiedlich sind auch die Methoden der Nutzung. Einige sind technisch ausgereift und schon lange in Anwendung, andere befinden sich noch in den Kinderschuhen oder sind bisher nur eine Vision.

Wellen

Meereswellen entstehen vor allem durch den Einfluss des Windes, sie sind also – wenn man so will – eine Art gespeicherter Windenergie. Eine Welle besteht aus kinetischer Energie, also bewegten Wasserteilchen, und aus Lageenergie, sichtbar an der Hebung und Senkung des Wassers von Wellenkamm zu Wellental. Die Leistung, die in einer großen Welle steckt, kann bis zu 50 Kilowatt pro Meter Wellenfront betragen.

So wie sich weltweit die Windverhältnisse stark unterscheiden, ist auch die Wellenenergie rund um die Welt sehr unterschiedlich hoch und ungleichmäßig nutzbar. Gute Bedingungen finden sich vor allem in den so genannten Westwindgürteln zwischen 30 und 60 Grad nördlicher und südlicher Breite, in denen der Wind über

OWC-Kraftwerk mit Wells-Turbine (siehe Prinzipbild Wellenkraftwerke 1)

Überflutungs-Kraftwerk (siehe Prinzipbild Wellenkraftwerke 1)

lange Strecken ungestört über das Meer weht. Deshalb eignen sich in Europa die Westküsten des Atlantik und der Nordsee am besten zur Nutzung der Wellenenergie. Die kinetische Energie und die Lageenergie der Welle lassen sich gleichermaßen zur Stromerzeugung nutzen. Dazu gibt es eine Vielzahl methodisch unterschiedlicher Projekte. Zwar sind die meisten Meeresenergie-Kraftwerke direkt an der Küste oder in Küstennähe angesiedelt, Strom lässt sich aber auch im offenen Meer erzeugen.

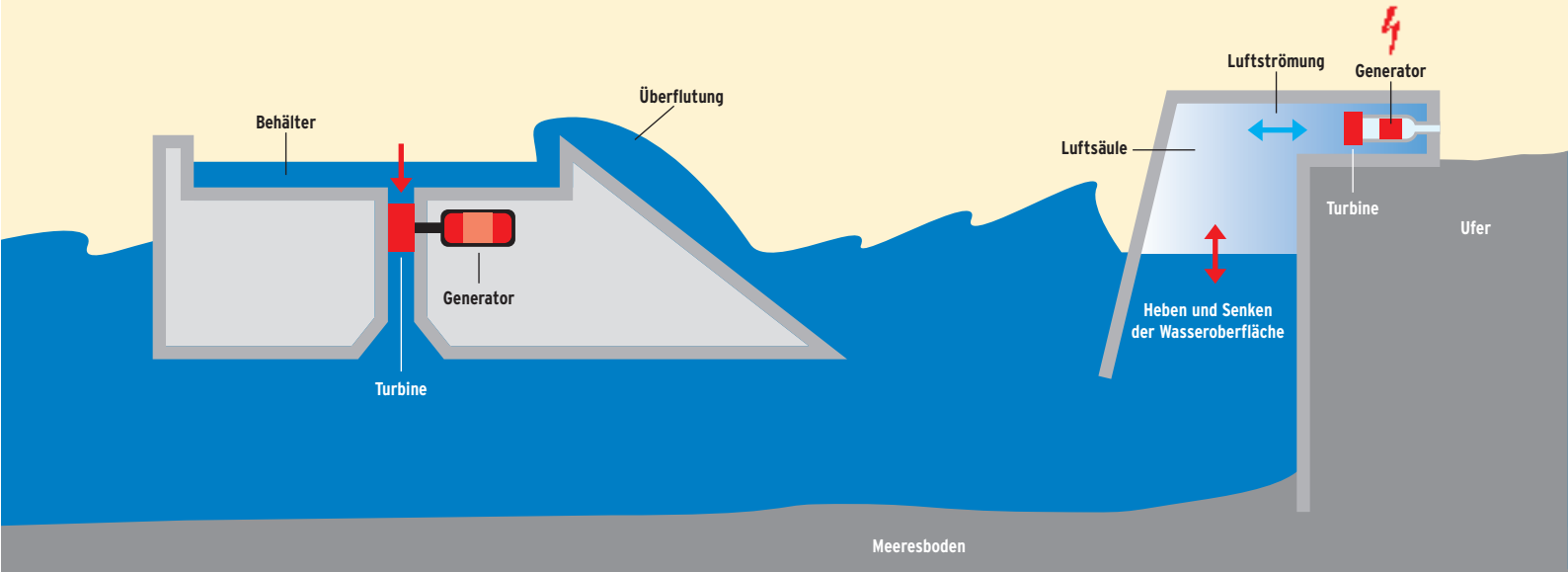
OWC (Oscillating Water Column)

In einem teilweise getauchten Hohlkörper führt die Hebebewegung des Wassers zu einem abwechselnden Zusammenpressen und Entspannen der Luft und damit zu einer sich hin und her bewegenden Luftströmung. Diese wird mit Hilfe von speziellen Turbinen, so genannten Wells-Turbinen, zur Stromerzeugung genutzt.

Überflutungsapparate (Overtopping Devices)

Der obere Teil der Wellen fließt in ein erhöhtes Reservoir. Die Lageenergie des Wassers wird dann mit Hilfe von Turbinen zur Stromerzeugung genutzt. Ein Beispiel: Der Wave Dragon in Dänemark hat eine elektrische Leistung von 7 MW – so viel wie fünf Windräder.

→ Wellenkraftwerke (1)



Links Überflutungskraftwerk, rechts OWC-Kraftwerk

Schwimmkörper-Kraftwerk (siehe Prinzipbild Wellenkraftwerke 2)

Hebeapparate (Heaving Devices)

Die vertikale Wasserbewegung der Welle wird mit Hilfe von mechanischen oder hydraulischen Systemen übertragen und mit Generatoren in elektrische Energie umgewandelt.

Schwimmkörper (Pitching Devices)

Mehrere miteinander verbundene Schwimmkörper werden durch die Wellenbewegung gegeneinander bewegt. Diese Bewegung wird mit speziellen, flüssigkeitsgetriebenen Generatoren zur Stromgewinnung genutzt. Brandungskraftwerke (Surging Devices) nutzen die horizontale Bewegung der Welle, um einen Pumpeffekt zu erhalten. Dieser wird mit Hilfe von Generatoren zur Stromerzeugung genutzt.

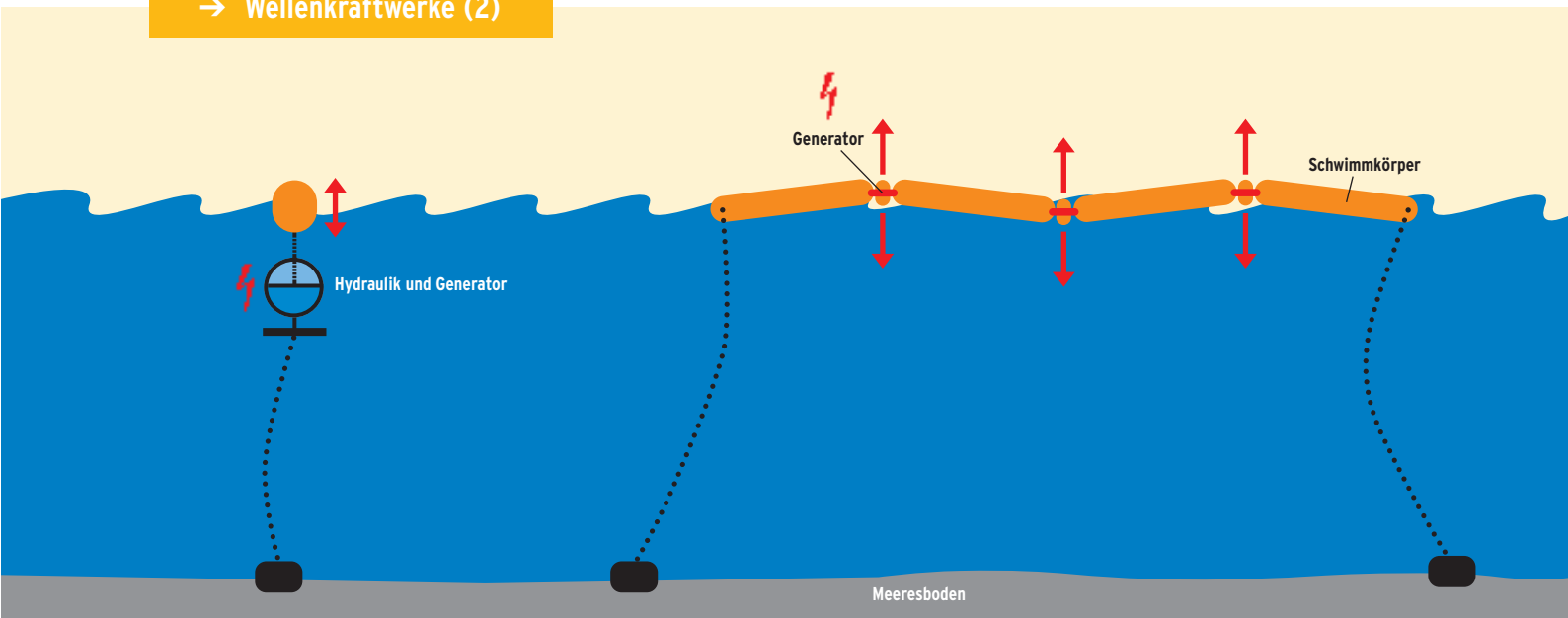
Strömung

Ähnlich wie bei Wellen gibt es auch für die Entstehung von Meeresströmungen ganz verschiedene Ursachen: Wind, Gezeiten oder wie beim Golfstrom ein Dichteunterschied aufgrund unterschiedlicher Wassertemperatur und Salzgehalt. Mit Strömungskraftwerken wird aus der Wasserbewegung mit Rotoren Strom erzeugt, sie ähneln Windkraftanlagen im Wasser. Die intensiven Bemühungen im Bereich der Windkraft kommen nun der Entwicklung von Strömungskraftwerken zu Gute.

Strömungskraftwerke funktionieren schon bei sehr langsamen Strömungsgeschwindigkeiten, denn Wasser hat eine viel höhere Dichte als Luft und transportiert dementsprechend mehr Bewegungsenergie. In Küstengebieten ist die Morphologie der Küste und des Meeresbodens von großer Bedeutung. Gerade bei trichterähnlichen Geländeformen wie Meerengen oder Bereichen zwischen Inseln steigt die Strömungsgeschwindigkeit.

Die unter Wasser liegenden Strömungskraftwerke brauchen wenig Fläche und machen auch keinen Lärm; sie haben darum nur geringe Umweltauswirkungen. Durch die langsame Rotation mit rund 15 Umdrehungen pro Minute dürften auch die Effekte auf Lebewesen und den Meeresboden (Sedimenttransport) begrenzt sein. Die Langzeitwirkungen werden derzeit detailliert erforscht. Mit dem vom Bundesumweltministerium geförderten Projekt “Seaflow” hat die Marine Current Turbines Ltd.,

→ Wellenkraftwerke (2)



Links Hebeapparat, rechts Schwimmkörper-Kraftwerk

Strömungskraftwerk "SeaGen" an der schottischen Küste

ein internationaler Verbund aus Wirtschafts- und Forschungsunternehmen, die weltweit erste Meeresströmungsturbine in Betrieb genommen. Seit 2003 wird an dem Prototyp mit 300 kW Leistung geforscht. Mit "SeaGen" ging 2005 eine Folgeanlage in den Test. Diese Doppelrotorturbine mit einer Leistung von 1 MW wird zur Zeit weiter erforscht.

Tidehub

Die unterschiedlichen Wasserstände der Tiden werden durch die wechselnden Anziehungskräfte von Sonne und Mond erzeugt. Den Wechsel zwischen Hoch- und Niedrigwasser kann man zur Stromerzeugung nutzen.

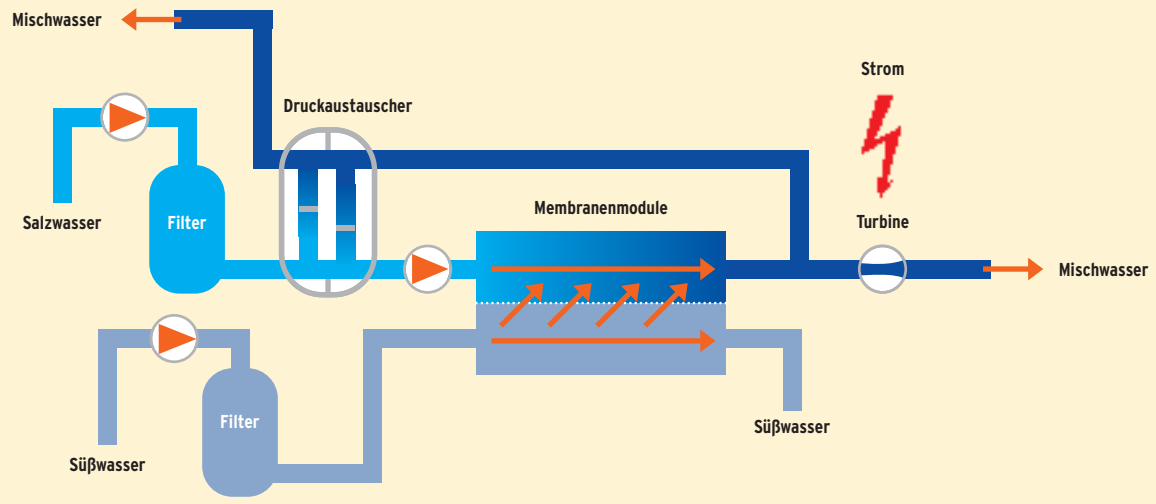
Die Technik ist vergleichbar mit traditionellen Wasserkraftwerken in Staudämmen: An geeigneter Stelle wird ein Damm zwischen Land und Meer gebaut, in den Tore mit Turbinen eingesetzt werden. Bei einem ausreichenden Unterschied der Wasserhöhe des Meeres und dem Bereich innerhalb des Damms werden die Tore geöffnet. Das zum niedrigeren Punkt fließende Wasser treibt die Turbinen an.

In La Rance (Frankreich) arbeitet ein Gezeitenkraftwerk mit 240 Megawatt seit über 40 Jahren erfolgreich, andere günstige Standorte mit einem Tidehub von bis zu zehn Metern finden sich in Großbritannien. An der deutschen Nordseeküste beträgt der Tidenhub lediglich drei Meter. Weltweit gibt es schätzungsweise rund 100 geeignete Standorte. Problematisch für deren Nutzung sind die Beeinträchtigungen der Flora und Fauna, aber auch der Schifffahrt, die sich durch die Absperrung der Meeresarme oder Flüsse ergeben.

Thermische Nutzung

Die Ozeanoberfläche erwärmt sich durch Sonneneinstrahlung, in größeren Tiefen bleibt die Wassertemperatur jedoch ganzjährig und unabhängig vom Wetter konstant. Der Temperaturunterschied kann bis zu 20 Grad Celsius betragen. Diese Differenz kann man mit Hilfe von Wärmetauschern zur Stromerzeugung nutzen, indem geeignete Flüssigkeiten verdampft werden und dieser Dampf dann Turbinen antreibt. Insbesondere die USA forschen an solchen OTEC-Kraftwerken (Ocean Thermal Energy Conversion). In Deutschland ist das Potenzial dagegen gering, da selbst im Sommer kein ausreichender Temperaturunterschied entsteht.

→ Prinzip eines Osmose-Kraftwerks



Osmose-Kraftwerke nutzen Konzentrationsunterschiede zwischen Salz- und Süßwasser zur Stromerzeugung.

Strömungskraftwerk "SeaGen" in Betrieb

Osmose

Wird Süßwasser mit Salzwasser über eine halbdurchlässige Membran in Kontakt gebracht, strömt Wasser von der Süßwasserseite auf die Salzwasserseite, um den Konzentrationsunterschied an Salz auszugleichen. Dadurch wird ein Druckunterschied aufgebaut. Diese Druckdifferenz kann man beispielsweise mittels Turbinen nutzen. Damit ist ein solches Osmose-Kraftwerk gewissermaßen die Umkehrung einer Meerwasser-Entsalzung, bei der Energie aufgewendet wird, um Salz- und Süßwasser voneinander zu trennen.

Osmose-Kraftwerke sind noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Die große technische Herausforderung liegt darin, Membranen zu entwickeln, die kostengünstig und langlebig sind und zugleich gut durchlässig für Wasser und undurchlässig für Salze.

Stand und Potenziale

Die Nutzung der Meeresenergie hat das Potenzial, einen bedeutenden Beitrag zur globalen Energieversorgung zu leisten und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren. Nach Aussagen des IPCC könnten theoretisch mehr als 8.000 TWh Strom pro Jahr aus Gezeitenströmungsenergie und bis zu 80.000 TWh aus Wellenenergie erzeugt werden. Bei der thermischen Energienutzung kommt man auf die gigantische Summe von 810.000 TWh theoretisch erzeugbaren Stroms.

Aktuell gibt es aber nur wenige Anlagen zur Meeresenergienutzung, einige befinden sich in der Testphase. Hohe Anfangsinvestitionen und Entwicklungskosten führen dazu, dass die Stromgestehungskosten bei einigen Nutzungsformen noch nicht oder nur langfristig konkurrenzfähig sind. Mit zunehmender technischer Reife ist aber mit einer Preisreduktion zu rechnen. Die Hersteller streben langfristig Stromgestehungskosten zwischen 5 und 10 Cent pro kWh an.

Zugleich birgt die Nutzung der Meeresenergie große technische Herausforderungen. Ein Problem ist die Anbindung von Anlagen vor der Küste oder im offenen Meer an das Stromnetz. Darüber hinaus unterliegen die Anlagen starker mechanischer Beanspruchung und Korrosion. Die Wartung insbesondere der sich unter Wasser befindenden Teile ist schwierig.

Deutschland bietet für einige Erzeugungsformen ausreichend Möglichkeiten. Meeresenergie wird aber, bezogen auf den Strommix, absehbar eine Nischenposition einnehmen. Die Exportchancen für deutsche Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus sind allerdings hervorragend.

ERNEUERBARE ENERGIEN UND DARÜBER HINAUS: WAS JEDER EINZELNE ZUM KLIMASCHUTZ BEITRAGEN KANN

Jeder kann erneuerbare Energien einsetzen. Die Installation einer Solaranlage oder die Beheizung der eigenen vier Wände mit Solarenergie, Biomasse oder Erdwärme sind wichtige Schritte zur Verbesserung der Energie- und Klimabilanz. Das **Marktanreizprogramm** fördert diese Heizungen. Auskünfte über Zuschüsse im Rahmen des Marktanreizprogramms erteilt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (www.bafa.de), aber auch das lokale Handwerk. Fragen zur Gewährung verbilligter Darlehen für gewerbliche oder kommunale Antragsteller beantwortet das Informationszentrum der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (www.kfw.de).

Ein erster Schritt bei dem Einbau einer erneuerbaren Heizung kann eine **umfangreiche Energieberatung** sein. Bei dieser Beratung wird geprüft, welche Heizung sich eignen würde, mit welchen Maßnahmen der Gebäudedämmung bzw. -sanierung der Einbau sinnvoll gekoppelt werden kann und welche weiteren Optimierungspotenziale bestehen. Auch diese Vor-Ort-Beratung wird durch einen Zuschuss gefördert. Auskünfte erteilen die örtlichen Energieberater oder Beratungsagenturen der Landkreise, Kommunen oder Stadtwerker. Eine Liste der Energieberater ist auf der Internetseite des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle www.bafa.de zu finden.

Das Bundesumweltministerium hat in Kooperation mit dem BINE Informationsdienst (www.bine.info) eine ausführliche **Broschüre über alle Fördermöglichkeiten** auf der Ebene der EU, des Bundes, der Länder, der Kommunen und der Energieversorgungsunternehmen herausgegeben. Eine umfassende **Förderdatenbank** bietet das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie an (http://db.bmwi.de).

Die Versorgung mit erneuerbarer Energie ist die eine Seite der Medaille. Aber die Energie aus Wind, Sonne, Biomasse und Erdwärme reicht nicht aus, um unseren heutigen verschwenderischen Umgang mit Energie aufrecht zu halten. Der **Energieverbrauch** muss der erneuerbaren Energieversorgung sozusagen entgegen kommen. Auf Dauer müssen Wirtschaft und Gesellschaft alte Energiefresser gegen effizientere Antriebe und Geräte eintauschen und den Maschinenpark der Vergeuder umrüsten. Der Endenergieverbrauch soll in Deutschland auf die Hälfte sinken – das wird Jahrzehnte dauern. Anfangen kann damit aber jeder heute und hier.

Was bringen Anstrengungen des Einzelnen? Viel. Das kann man mit dem persönlichen CO_2-Rechner im Internet unter http://ifeu.klima-aktiv.de sehr schnell und unterhaltsam testen: Unsere Energie verbrauchen wir zu ähnlichen Teilen in den Bereichen Ernährung und Konsum, Mobilität sowie Wohnen. Der durchschnittliche Deutsche emittiert jedes Jahr etwa zehn Tonnen CO_2. Das ist etwa drei mal so viel wie die Menschen im globalen Durchschnitt und schon fünf mal so viel, wie die auch von der Bundesregierung anerkannte Zielmarke von zwei Tonnen CO_2, die langfristig alle Menschen auf der Welt erreichen sollen.

Wenn Sie Ihr Leben in Deutschland heute überwiegend nach Klimaschutzkriterien organisieren würden, kämen Sie schon auf einen Wert von knapp fünf Tonnen CO_2 pro Jahr. Das verlangt Einiges: Kein eigenes Auto, keine Flugreisen, Holzpelletheizung im Keller, Ökostrom und Energiesparlampen; vegetarisch leben und Ökoprodukte aus der Region; insgesamt wenig und eher dauerhafte Güter konsumieren. Eine lange Liste. Andererseits bringt es ein konsumkräftiger, reiselustiger Autovielfahrer im eigenen Haus schnell auf 30 Tonnen CO_2 pro Jahr. Man sieht also, Verhalten wirkt sich aus.

Bei den **Energiespartipps** sehen Sie, dass man auch ohne große Umstellungen seine Emissionen drastisch senken kann. Fangen wir an mit der Energiediät.

Die wichtigsten Tipps, wie Sie Energie sparen können, ohne Ihr Verhalten und ihre Gewohnheiten wesentlich zu ändern:

	WENN DAS (FAST) ALLE TÄTEN:	MÖGLICHE GESAMTEINSPARUNGEN IN MIO. TONNEN CO_2
ÖKOSTROM BESTELLEN	Wenn zehn Millionen Haushalte den Stromanbieter wechseln und Ökostrom kaufen, senken sie ihre CO_2-Emissionen von durchschnittlich 605 auf 40 Gramm CO_2/kWh.	**20**
HAUS SANIEREN	Drei Viertel aller deutschen Wohnhäuser sind älter als dreißig Jahre und haben einen Heizenergiebedarf von durchschnittlich 180 kWh/m^2. Wenn man nur zehn Prozent der Wohnfläche auf Niedrigenergie-Standard bringt (50 kWh/m^2), lassen sich 31,2 Mrd. kWh einsparen.	**9,4**
STAND-BY-SCHALTUNG ABSCHALTEN	Stand-by-Schaltungen verschwenden in jedem Haushalt 375 kWh pro Jahr. Das sind mindestens 60 Euro pro Jahr. Fernseh-, Video- und Audiogeräte sowie elektrische Boiler sind die Hauptquellen.	**9,0**
ENERGIESPAR-BIRNEN EINSETZEN	Die Beleuchtung macht 8 Prozent des Stromverbrauchs der Haushalte aus. Davon lassen sich 40 Prozent sparen.	**3,8**
MODERNE UMWÄLZPUMPEN EINBAUEN	Moderne Umwälzpumpen sparen bis zu 80 Prozent der Energie, die man braucht, um das warme Heizungswasser durchs Gebäude zu pumpen. In Deutschland müssten 8 Millionen Zentralheizungen erneuert werden.	**1,7**
ENERGIE SPARENDEN KÜHLSCHRANK ANSCHAFFEN	12 Mio. Kühlschränke sind schlechter als Effizienzklasse A. Ihr Stromverbrauch (rund 350 kWh/Jahr) lässt sich mit Geräten der Energiesparklasse A+ um zwei Drittel reduzieren. Die Anschaffung rechnet sich meist nach spätestens fünf Jahren.	**2,5**
SPRITSPARENDES AUTO FAHREN	Der durchschnittliche CO_2-Ausstoß der jährlich mehr als eine Million neu zugelassenen privaten Pkw liegt bei 172,5 g/km. Sparsame Autos emittieren nur 120 Gramm CO_2 pro Kilometer.	**0,8**

Mit Umstellungen sind die folgenden Energiespartipps verbunden. Weniger wohl fühlt man sich dabei aber auch nicht.

	WENN DAS (FAST) ALLE TÄTEN:	MÖGLICHE GESAMTEINSPARUNGEN IN MIO. TONNEN CO_2
WENIGER AUTO FAHREN	Die deutschen Pendler legen täglich 446 Mio. Kilometer zurück. Der Durchschnittsverbrauch liegt bei 8 Liter Benzin pro 100 km. Zehn Prozent weniger Pendelstrecke sparen 1,3 Mrd. Liter Benzin.	**3,6**
HEIZUNG ZURÜCK DREHEN	Die Gebäudeheizung erzeugt 162 Mio. t CO_2. Ein Grad niedrigere Raumtemperatur senkt Energieverbrauch und CO_2-Emissionen im Bereich Wohnen schon um 6 Prozent.	**9,7**
SAISONALE NAHRUNGSMITTEL KAUFEN	Mit dem Verzicht auf Gemüse, das in beheizten Treibhäusern wächst oder mit dem Flugzeug herangeschafft wird, lassen sich 7 Prozent der individuellen CO_2-Emissionen einsparen.	**9,5**
WENIGER FLEISCH ESSEN	Durch unsere Ernährung verursachen wir 1,65 t CO_2-Ausstoß pro Person und Jahr. Fleisch ist besonders klimaschädlich. Unser Verbrauch ließe sich leicht um 20 Prozent reduzieren.	**6,8**
RAD FAHREN	19 Mio. Pendler fahren täglich mit dem eigenen Pkw zur Arbeit. Da die Hälfte der Arbeitswege kürzer sind als 10 km, ließen sich leicht 10 Prozent der Strecken mit dem Rad zurücklegen. Das ist nicht nur gut für die CO_2-Bilanz, sondern auch gegen das in Deutschland verbreitete Übergewicht.	**2,3**
BAHN FAHREN STATT FLIEGEN	Zuletzt haben Fluggäste 9,5 Mrd. Personenkilometer auf innerdeutschen Flügen zurückgelegt. Wenn sie die Bahn nehmen, sinkt der CO_2-Ausstoß von 193 auf 56 Gramm CO_2 pro Personenkilometer.	**1,3**

GLOSSAR

Biogas	Bei der Vergärung organischer Materie entstehendes Gas, das überwiegend aus Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) besteht. Biogas zählt zur Biomasse.
Biomasse	Die gesamte durch Pflanzen und Tiere anfallende/erzeugte organische Substanz. Beim Einsatz von Biomasse zu energetischen Zwecken ist zwischen nachwachsenden Rohstoffen (Energiepflanzen) und organischen Reststoffen und Abfällen zu unterscheiden.
CO_2	siehe Kohlendioxid
Deponiegas	Energiereiches Gas, das bei der Verrottung von Abfällen entsteht.
Demand-Side-Management	siehe Lastmanagement
Einheiten	1 Joule (J) ist die Basiseinheit für Energie. 1 J = 1 Nm (Newtonmeter) = 1 Ws (Wattsekunde). Da 1 J nur einer geringen Energiemenge entspricht, werden meist Vielfache dieser Einheit verwendet: kJ = 10^3 Joule = Tausend Joule (Kilo-) MJ = 10^6 Joule = Millionen Joule (Mega-) GJ = 10^9 Joule = Milliarde Joule (Giga-) TJ = 10^{12} Joule = Billion Joule (Tera-) PJ = 10^{15} Joule = Billiarde Joule (Peta-) EJ = 10^{18} Joule = Trillion Joule (Exa-) Eine gebräuchliche Einheit ist auch die kWh (Kilowattstunde). 1 kWh = 3.600 kJ = 3,6 MJ 1 GWh = 10^6 kWh = 1 Million kWh = 3.600 GJ 1 TWh = 10^9 kWh = 1 Milliarde kWh = 3.600 TJ In Statistiken vielfach verwendete Einheiten sind: 1 Mio. t SKE = 1 Million Tonnen Steinkohleeinheiten = 8,14 TWh 1 Mill. t ROE = 1 Million Tonnen Rohöleinheiten = 11,63 TWh 1 W ist die Basiseinheit für die Leistung von Energieanlagen. Sie entsteht durch Division der Energieeinheit durch die Zeit, also 1 W = 1 J/s kW = 10^3 Watt = Tausend Watt MW = 10^6 Watt = Millionen Watt GW = 10^9 Watt = Milliarden Watt
Emissionen	Emissionen sind die von einer Anlage, einem Gebäude oder einem Verkehrsmittel in die Umwelt (Boden, Wasser, Luft) abgegebenen gasförmigen, flüssigen und festen Schadstoffe. Auch die Abgabe von Wärme, Strahlung, Geräuschen und Gerüchen gilt als Emission. Die Einwirkung von Emissionen wird als Immission bezeichnet.

Energie	Energie ist die Fähigkeit oder Möglichkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten. Gemessen wird Energie in der Einheit Joule (J). Physikalisch betrachtet kann Energie weder erzeugt noch vernichtet werden, sondern nur von einer Form in die andere umgewandelt werden. Man unterscheidet folgende Energieformen: mechanische Energie (Bewegungs- oder kinetische Energie; Lageenergie), Wärmeenergie (thermische Energie), elektrische Energie, chemische Energie, Strahlungsenergie, Energie aus der Spaltung und Fusion von Atomkernen.
Endenergie	Vom Endverbraucher genutzte Energieträger (Primärenergie, d.h. Primärenergie abzüglich aller Umwandlungs- und Verteilungsverluste, des Eigenverbrauchs von Kraftwerken und Raffinerien und des Einsatzes von Rohenergie für nichtenergetische Zwecke).
Energieintensität	Das Verhältnis des Primärenergieverbrauchs zum Bruttosozialprodukt einer Volkswirtschaft.
Energiepflanzen	Pflanzen, die mit dem Ziel der Energienutzung angebaut werden, beispielsweise Getreidesorten wie etwa Mais, Weizen, Roggen oder Triticale, Gräser wie Chinaschilf (Miscanthus) und Weidegras. Als Energiepflanzen werden auch Ölsaaten wie Raps und Sonnenblumen, schnell wachsende Hölzer wie Pappeln und Weiden sowie Rüben und Hanf angebaut.
Energieproduktivität	Verhältnis der volkswirtschaftlichen Gesamtleistung (z. B. Bruttosozialprodukt) zur aufgewendeten Energie (Kehrwert der Energieintensität).
Energiereserven	Die in der Erde lagernden Vorräte an Brennstoffen, die nachgewiesen, sicher verfügbar und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbar sind.
Energieressourcen	Neben den Energiereserven gibt es nachgewiesene und vermutete Vorräte von Energieträgern (so genannte Energieressourcen), die jedoch derzeit aus technischen und/oder wirtschaftlichen Gründen noch nicht gewinnbar sind.
Erdwärme	Wärmeenergie des Erdinneren
Erneuerbare Energien	auch regenerative Energien, sind Energiequellen, die nach den Zeitmaßstäben des Menschen unendlich lange zur Verfügung stehen. Die drei originären Quellen sind: Solarstrahlung, Erdwärme (Geothermie), Gezeitenkraft. Diese können entweder direkt genutzt werden oder indirekt in Form von Biomasse, Wind, Wasserkraft, Wellenenergie sowie Umgebungswärme.
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Fernwärme	Thermische Energie, die durch ein System isolierter Rohre zum Endverbraucher gelangt.
Fossile Brennstoffe	Aus Biomasse im Verlaufe von Jahrmillionen entstandene Energierohstoffe: Öle, Kohlen, Gase.
Photovoltaik	Unmittelbare Umwandlung von Sonnenstrahlung in elektrische Energie mittels Halbleitern, sogenannten Solarzellen.
Geothermie	Erdwärme

Grubengas	Energiereiches Gas, das aus den Kohlegruben entweicht.
Grundlast	Anteil der Nachfrage nach elektrischer Energie, der rund um die Uhr nachgefragt wird.
HDR-Verfahren	Hot-Dry-Rock-Verfahren erlaubt die Nutzung von tiefer Erdwärme auch in Gesteinsschichten, die kein Thermalwasser führen. Dazu wird ein zerklüftetes Risssystem als Wärmetauscher geschaffen, in den dann Wasser injiziert, erwärmt und wieder an die Oberfläche transportiert wird.
Hydrothermie	Nutzung von Thermalwasser zur geothermischen Strom- (Mindesttemperatur 80 bis 100 °C) oder Wärmebereitstellung.
Holzpellets	In Stäbchenform gepresstes Brennmaterial aus Holz.
Immission	Als Immissionen bezeichnet man die Einwirkung von Emissionen (Luftschadstoffen, Geräuschen, Strahlung usw.) auf Boden, Wasser, Menschen, Tiere, Pflanzen und Sachgüter. Messgröße ist z. B. die jeweilige Konzentration eines Schadstoffes pro Quadratmeter Boden oder pro Kubikmeter Luft.
Kalina-Prozess	Verfahren zum Betrieb von Dampfturbinen auch bei niedrigen Temperaturen mittels eines Ammoniak-Wasser-Gemisches als Wärmeträger.
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau, Bank des Bundes und der Länder
Klärgas	Energiereiches Gas, das im Faulturm von Kläranlagen entsteht.
Kohlendioxid (CO_2)	Eines der Treibhausgase mit der Eigenschaft, für langwellige Wärmestrahlung "undurchlässig" zu sein. Verhindert damit die gleichgewichtige Abstrahlung der auf die Erde treffenden kurzwelligen Sonnenstrahlung. Gefahr einer Temperaturerhöhung auf der Erdoberfläche.
kWh	siehe Einheiten
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung, d. h. gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme.
Lastmanagement	Anpassung des Stromverbrauchs an das Stromangebot, z. B. durch Verlagerung in Nachtzeiten oder Zeiten hohen Windstromangebots durch zeitvariable Tarife, automatische Steuerungen o.ä.
MAP	Marktanreizprogramm: Programm des Bundesumweltministeriums (BMU) zur Förderung von Anlagen zur Wärmegewinnung aus erneuerbaren Energien
Merit-Order-Effekt	Verdrängung von Kraftwerken, die relativ teuer Strom produzieren, durch den Markteintritt von zusätzlichen Kraftwerken. Der Begriff "Merit-Order" bezeichnet die Einsatzreihenfolge von Kraftwerken. Diese Reihenfolge bestimmt sich in der Regel über den Preis. Dies gilt nicht für Kraftwerke, die EEG-Strom einspeisen. Für diese wird der Markteintritt gesetzlich erzwungen. Dadurch werden relativ teure konventionelle Kraftwerke vom Netz genommen, wodurch der Börsenpreis sinkt.
Nachwachsende Rohstoffe	Auch "Nawaro": Land- und forstwirtschaftlich erzeugte Biomasse, die zur Energiebereitstellung oder als Werkstoff genutzt wird (Energiepflanzen).

Niedrigenergiehaus	Niedrigenergie bezeichnet einen Gebäude-Dämmstandard, der jedoch nicht genau definiert ist. In der derzeitigen Baupraxis sind meist Häuser gemeint, die gut gedämmt sind und einen spezifischen Jahres-Heizwärmebedarf bei Mehrfamilienhäusern von 50 kWh/(m^2·a) und bis 70 kWh/(m^2·a) bei Einfamilienhäusern aufweisen.
Nutzenergie	Energie, die nach der letzten Umwandlung der Energie in Geräten dem Verbraucher zur Verfügung steht.
Offshore-Windenergie	Stromerzeugung mit Windenergieanlagen auf See.
Organic Rankine Cycle (ORC)	Verfahren des Betriebs von Dampfturbinen mit einem anderen Arbeitsmittel als Wasserdampf. Als Arbeitsmittel werden organische Flüssigkeiten mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur verwendet. Das Verfahren kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn das zur Verfügung stehende Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und -senke zu niedrig für den Betrieb einer von Wasserdampf angetriebenen Turbine ist.
Organische Reststoffe	Organische Reststoffe und Abfälle fallen bei der Land-, Fisch- und Forstwirtschaft, der Industrie und den Haushalten an. Es zählen dazu: Abfall- und Restholz, Stroh, Gras, Laub, Dung, Gülle, Bioabfall etc. Produkte aus organischen Rest- und Abfallstoffen sind insbesondere Biogas, Deponiegas, Klärgas.
Passivhaus	Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in dem eine behagliche Temperatur sowohl im Winter als auch im Sommer ohne separates Heiz- bzw. Klimatisierungssystem zu erreichen ist. Der Heizwärmebedarf beträgt weniger als 15 kWh/(m^2·a) und der Primärenergiebedarf einschließlich Warmwasser und Haushaltstrom liegt unter 120 kWh/(m^2·a). Das Passivhaus ist eine konsequente Weiterentwicklung des Niedrigenergiehauses (NEH).
Primärenergie	Primärenergie ist der rechnerische Energiegehalt eines natürlich vorkommenden Energieträgers, bevor er z. B. durch Verbrennung umgewandelt wird. Zu den Primärenergieträgern zählen erschöpfliche Energieträger wie Stein- und Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uranerz sowie erneuerbare Energien (Sonnenenergie, Windkraft, Wasserkraft, Erdwärme und Gezeitenenergie). In Deutschland war 2007 Mineralöl mit 33,8 % der wichtigste Primärenergieträger, gefolgt von Erdgas (22,7 %), Steinkohle (14,1%), Braunkohle (11,7 %) und der Atomenergie (11,1 %). Die erneuerbaren Energieträger deckten rund 3 % des Primärenergieverbrauchs.
Receiver	Solarstrahlungsabsorber, der in solarthermischen Turmkraftwerken eingesetzt wird.
Regelleistung	Leistung, die für den kurzfristigen Ausgleich von Schwankungen in Erzeugung und Verbrauch von Strom bereitgehalten wird. Als Regelkraftwerke werden Dampfturbinen-, Speicherwasser-, Pumpspeicher- und Gasturbinenkraftwerke eingesetzt, die entweder im Teillastbetrieb operieren oder im Bedarfsfall gestartet werden.
Repowering	Ersatz alter Anlagen zur Stromerzeugung durch neue, leistungsstärkere Anlagen am selben Standort.
Sekundärenergie	Energie, die als Ergebnis eines Umwandlungsprozesses aus Primärenergie gewonnen wird. Dabei vermindert sich die nutzbare Energiemenge durch Umwandlungs- und Transportverluste. Sekundärenergieträger sind entweder leitungsgebunden wie Strom, Fernwärme und Stadtgas oder die veredelten Produkte Benzin, Heizöl, Koks, Briketts etc.

Smart Meter	"Intelligenter" Stromzähler, der im Vergleich zu den herkömmlichen Stromzählern nicht nur die Verbrauchsmenge, sondern z. B. auch den Zeitpunkt des Verbrauchs erfasst. Die Zählerdaten werden elektronisch an den Stromanbieter übermittelt. Die Höhe des Strombedarfs, z. B. Lastspitzen, lassen sich erkennen, speichern und zu Rechnungszwecken auswerten.
Solarstrahlung	Man unterscheidet diffuse Solarstrahlung, die uns indirekt aus allen Richtungen nach Streuung an Wolken, atmosphärischen Molekülen und Partikeln erreicht und direkte Solarstrahlung, die uns unmittelbar aus Richtung der Sonne erreicht. In der Summe bilden diffuse und direkte Strahlung die Globalstrahlung.
Solarthermische Kraftwerke	Kraftwerke, bei denen die Solarstrahlung in Wärme umgewandelt, auf einen Wärmeträger (z. B. Öl, Luft) übertragen und schließlich in Kraftmaschinen (z. B. Dampfturbine, Gasturbine) in elektrische Energie umgesetzt wird.
Solarzelle	Solarzellen wandeln Licht direkt in elektrischen Strom um. Die Photonen des Sonnenlichts lösen in Halbleitermaterialien Elektronen zeitweise aus dem Atomverband und bewirken so einen Stromfluss. Dieses Funktionsprinzip wird als photovoltaischer Effekt bezeichnet (Photovoltaik). Als Halbleitermaterial wird in Solarzellen meist Silizium verwendet, das letztlich aus Quarzsand gewonnen wird.
Sonnenkollektor	Sonnenkollektoren wandeln die Strahlungsenergie der Sonne in nutzbare Wärme zur Warmwasserbereitung oder Heizungsunterstützung um. Die Wärmeverluste des Kollektors werden vermindert durch eine Glasabdeckung und durch Wärmedämmung der Rückseite. Bei einfachen Systemen kann auf das Prinzip der "Wärmefalle" verzichtet werden; man spricht dann von Solarabsorbern.
Spitzenlast	Elektrische Leistung, die nur an wenigen Tagen im Jahr oder an wenigen Stunden am Tag nachgefragt wird.
Spitzenleistung	Maximalleistung eines Sonnenenergiewandlers bei Standardbedingungen: Globalstrahlung der Stärke 1.000 W/m^2, Umgebungstemperatur von 25 °C und Spektralverteilung der Sonne bei 1,5-facher Durchquerung der Erdatmosphäre, üblicherweise nur bei Photovoltaikanlagen als Bezugsgröße gewählt. Die Werte sind reproduzierbare Laborwerte, die aber in der Natur in unseren Breiten niemals auftreten.
Steinkohleeinheit (SKE)	Einheiten
Virtuelles Kraftwerk	Eine Zusammenschaltung von kleinen, dezentralen Kraftwerken, wie zum Beispiel Photovoltaikanlagen, Kleinwasserkraftwerken und Biogasanlagen, kleinen Windenergieanlagen und Blockheizkraftwerken kleinerer Leistung, gegebenenfalls aber auch verschiedener Lasten zu einem Verbund, der gemeinsam gesteuert wird.
Volllaststunden	Betriebszeit einer Anlage bezogen auf volle Stunden als Maß für deren Auslastung. Das jährliche Maximum liegt bei 8.760 Stunden.
Wirkungsgrad	Verhältnis von Energieertrag zu Energieeinsatz.
Windenergieanlagen	Unter Windenergieanlagen (WEA) oder Windenergiekonvertern (WEK) werden hier im engeren Sinne Anlagen zur Umwandlung von Windenergie in elektrische Energie verstanden.
Watt-Peak (WP)	Spitzenleistung

Wärmepumpe	Technische Anlage, mit der das Temperaturniveau von verfügbarer Wärmeenergie erhöht werden kann, so dass eine technische Nutzung möglich wird.
Wechselrichter	Gerät zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom.

„Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen ...“

Grundgesetz, Artikel 20 a

BESTELLUNG VON PUBLIKATIONEN:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Postfach 30 03 61
53183 Bonn
Tel.: 0228 99 305 - 33 55
Fax: 0228 99 305 - 33 56
E-Mail: bmu@broschuerenversand.de
Internet: www.bmu.de

Diese Publikation ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Gedruckt auf Recyclingpapier.